



TITLE:

ポテンシャルの概念に基づく地震 火災時の都市避難性状予測手法の 開発(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

西野, 智研

CITATION:

西野, 智研. ポテンシャルの概念に基づく地震火災時の都市避難性状予測手法の開発. 京都大学, 2011, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2011-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k16027>

RIGHT:

ポテンシャルの概念に基づく

地震火災時の都市避難性状予測手法の開発

西野 智研

目次

第1章 序論

1.1	研究の背景.....	1
1.1.1	地震火災のリスク.....	1
1.1.2	地震火災の安全対策.....	2
1.2	研究の目的.....	3
1.2.1	既往の避難性状予測手法.....	3
1.2.2	新しい避難性状予測手法.....	6
1.3	本研究の構成.....	9

第2章 ポテンシャルの概念に基づく避難性状予測モデル

2.1	はじめに.....	15
2.2	火災危険度ポテンシャル評価モデル.....	16
2.2.1	燃焼建物からの輻射熱伝達.....	17
2.2.2	複数の熱気流による温度上昇.....	18
2.3	心理危険度ポテンシャル評価モデル.....	21
2.3.1	支配方程式の導出.....	22
2.3.2	避難者の考える避難先.....	23
2.4	避難者の行動モデル.....	24
2.4.1	火災に起因した避難の開始.....	25
2.4.2	避難者の移動速度.....	26
2.4.3	避難経路の確率的な選択.....	27
2.4.4	累積曝露量に基づく避難の不能.....	28
2.5	まとめ.....	29

第3章 計算負荷の軽減を重視した市街地火災の物理的延焼モデル

3.1	はじめに.....	33
3.1.1	延焼モデルの概要.....	34
3.2	建物内部の準定常火災モデル.....	35
3.2.1	新しい時系列解法.....	37
3.2.2	可燃物の質量減少速度.....	38
3.2.3	可燃物の燃焼に伴う発熱速度.....	40
3.2.4	開口部を経由した質量の移動.....	40
3.2.5	開口部材への熱伝達とその脱落.....	42
3.2.6	壁の燃え抜け.....	43
3.3	建物間の火災拡大モデル.....	44
3.3.1	火災室の高温気体からの輻射熱伝達.....	44
3.3.2	開口噴出火炎からの輻射熱伝達.....	44
3.4	準定常火災モデルの予測精度の検証.....	47
3.4.1	計算条件.....	47
3.4.2	計算結果とその考察.....	49
3.5	延焼モデルの予測精度と計算負荷の検証.....	51
3.5.1	酒田市大火の概要.....	51
3.5.2	計算条件.....	52
3.5.3	計算結果とその考察.....	53
3.6	まとめ.....	57

第4章 住民による消火活動を考慮した飛び火現象の確率論的予測モデル

4.1	はじめに.....	61
4.2	飛び火による建物間延焼の確率論的モデル.....	62
4.2.1	飛び火発生確率.....	63
4.2.2	火の粉の発生量.....	65
4.2.3	火の粉の飛来確率.....	65
4.2.4	住民による火の粉の消火確率.....	66
4.3	酒田市大火との比較による飛び火モデルの検証.....	68
4.3.1	計算条件.....	68
4.3.2	計算結果とその考察.....	71
4.4	まとめ.....	78

第5章 地震火災時における住民の避難先選択のモデル化

5.1	はじめに.....	83
5.2	京都市住民に対するヒアリング調査.....	84
5.2.1	調査の概要.....	84
5.2.2	調査の質問内容.....	87
5.2.3	調査結果とその考察.....	88
5.3	地震火災時における住民の避難先選択モデル.....	90
5.3.1	選択確率.....	90
5.3.2	避難先選択モデルの検証.....	92
5.4	避難先選択モデルの京都市全域への適用.....	96
5.4.1	計算条件.....	96
5.4.2	計算結果とその考察.....	97
5.5	まとめ.....	99

第6章 避難性状予測モデルの検証

6.1	はじめに.....	103
6.2	関東大震災（1923）の再現.....	104
6.2.1	震災（東京市）の概要.....	104
6.2.2	計算条件.....	106
6.2.3	計算結果とその考察.....	110
6.3	まとめ.....	119

第7章 避難シミュレーションを用いた避難安全対策の有効性評価

7.1	はじめに.....	123
7.2	京都市の概要.....	124
7.3	京都市住民の避難性状.....	126
7.3.1	計算条件.....	126
7.3.2	計算結果とその考察.....	130
7.4	避難安全対策とその効果.....	138
7.4.1	対策の選択肢.....	138
7.4.2	対策の効果.....	139
7.5	まとめ.....	141

第 8 章 総括

8.1 本研究の成果.....	143
8.2 課題と展望.....	147

謝辞

研究業績リスト

主な記号

第1章 序論

英字(大文字)

P : 避難経路の通過可能確率 (-)

英字(小文字)

n : 流動量 (人/s)

p : 単位長さあたりの避難者発生数 (人/m), 確率 (-)

t_0 : 最遅避難開始時間 (s)

v : 歩行速度 (m/s)

w : 道路幅 (m)

x : 距離 (m)

y : 距離 (m)

ギリシャ文字(小文字)

α : 群集流動係数 (人/ms)

β : 道路面積の比率 (-)

ρ : 人口密度 (人/m²), 出火密度 (件/m²)

第2章 ポテンシャルの概念に基づく避難性状予測モデル

英字(大文字)

\mathbf{P} : 避難者から気流軸に下ろした垂線の足の位置ベクトル (m)

\dot{Q} : 発熱速度 (kW)

\mathbf{Q} : 避難者の位置ベクトル (m)

R : 避難場所までの最短経路の集合 (-)

T : 温度 (K)

T_b : 人体の表面温度 (K)

T_{cr} : 確実に避難を開始する限界曝露温度 (K)

T_∞ : 外気温度 (K)

ΔT : 避難者が曝される熱気流による温度上昇 (K)
 ΔT_0 : 熱気流の気流軸上の温度上昇 (K)
 \mathbf{T} : 熱気流の気流軸の単位方向ベクトル (m)
 U_∞ : 市街地風の風速 (m/s)

英字(小文字)

c_p : 気体の定圧比熱 (=1.0kJ/kgK)
 d : 輻射源と避難者の距離 (m), ダミー変数 (-)
 g : 重力加速度 (=9.8m/s²)
 g_{ij} : 道路 ij のポテンシャル勾配 (1/s)
 h : 対流熱伝達率 (kW/m²K)
 l : 道路に沿った距離 (m)
 n_{ij} : 道路 ij の避難者数 (人)
 p_E : 避難開始確率 (-)
 p_{ij} : 道路 ij の選択確率 (-)
 p_R : 避難場所の選択確率 (-)
 \dot{q}'' : 燃焼建物から避難者に入射する熱流束 (kW/m²)
 \dot{q}''_B : 人体表面から放射される熱流束 (kW/m²)
 \dot{q}''_{cr} : 確実に避難を開始する限界熱流束 (kW/m²)
 \dot{q}''_H : 周辺気体と人体表面の間で対流により伝達される熱流束 (kW/m²)
 \dot{q}''_N : 正味の伝達熱流束 (kW/m²)
 \dot{q}''_∞ : 周辺気体から放射される熱流束 (kW/m²)
 s : 住民の初期位置と避難場所との直線距離 (km)
 s_{ij} : 道路 ij の長さ (m)
 t : 在住期間 (10³ 年)
 u : 流速 (m/s)
 v : 流速 (m/s)
 v_{ij} : 道路 ij の避難者の移動速度 (m/s)
 x : 距離 (m)
 y : 距離 (m)

ギリシャ文字(大文字)

Γ : 累積曝露量 (K^{0.725}s)
 Γ_F : 致死量 (K^{0.725}s)
 Θ : 閾値 (-)
 Φ_F : 火災危険度ポテンシャル (-)
 Φ_O : 避難ポテンシャル (-)
 Φ_P : 心理危険度ポテンシャル (-)
 Ψ : 魅力度 (-)

Ω : 無次元風速 (-)

ギリシャ文字(小文字)

α : 市街地風と地表面上に設定した座標軸とがなす角度 (rad)

θ : 熱気流の傾き (rad)

ξ : 気流軸上の火源からの高さ (m)

π : 円周率 (-)

ρ_{ij} : 道路 ij の人口密度 (人/m²)

ρ_{∞} : 外気の密度 (kg/m³)

σ : ステファン・ボルツマン定数 ($=5.67 \times 10^{-11}$ kW/m²K⁴)

ϕ : 速度ポテンシャル (m²/s)

χ_F : 熱流束をポテンシャルに変換するための係数 (m²/kW)

χ_P : 距離をポテンシャルに変換するための係数 (1/m)

第3章 計算負荷の軽減を重視した市街地火災の物理的延焼モデル

英字(大文字)

A_D : 開口部材の面積 (m²)

A_F : 可燃物の燃焼面積 (m²)

A_O : 開口部の面積 (m²)

A_W : 壁の表面積 (m²)

B : 開口幅 (m)

C_{∞} : 風圧係数 (-)

F : 形態係数 (-)

H_F : 円筒形輻射面の高さ (m)

H_l : 開口下端高さ (m)

H_u : 開口上端高さ (m)

ΔH_F : 可燃性気体の燃焼熱 (kJ/kg)

ΔH_O : 酸素の燃焼熱 (kJ/kg)

L_F : 噴出火炎気流軸の壁面からの離隔距離 (m)

L_V : 水分の蒸発潜熱 (kJ/kg)

\dot{Q}_B : 可燃物の燃焼に伴う発熱速度 (kW)

Q''_{cr} : 燃え抜け限界熱量 (kJ/m²)

\dot{Q}_D : 開口部材への輻射失熱速度 (kW)

\dot{Q}_{EX} : 検査体積の外部から入射する単位時間あたりの熱量 (kW)

$\Sigma \dot{Q}_L$: 検査体積からの失われる単位時間あたりの熱量 (kW)

\dot{Q}_O : 開口を經由した輻射失熱速度 (kW)

\dot{Q}_w : 壁への失熱速度 (kW)
 T : 温度 (K)
 ΔT_F : 噴出火炎の気流軸上の温度上昇 (K)
 T_G : 開口部材の温度 (K)
 T_p : 可燃物の熱分解温度 (K)
 T_w : 壁の室内側の表面温度 (K)
 T_∞ : 外気温度 (K)
 U_∞ : 市街地風の風速 (m/s)
 V : 検査体積 (m³)
 Y : 気体中の化学種の質量分率 (-)
 Z_N : 中性帯高さ (m)

英字(小文字)

c_p : 気体の定圧比熱 (=1.0kJ/kgK)
 g : 重力加速度 (=9.8m/s²)
 h : 壁の対流熱伝達率 (kW/m²K)
 k_w : 壁の熱伝導率 (kW/mK)
 \dot{m} : 開口流量 (kg/s)
 \dot{m}_B : 可燃物の質量減少速度 (kg/s)
 \dot{m}_v'' : 単位体積あたりの水分の蒸発速度 (kg/m³s)
 p : 圧力 (Pa=N/m²)
 p_0 : 大気圧に対する地表面相対圧力 (Pa)
 \dot{q}'' : 入射熱流束 (kW/m²)
 \dot{q}_F'' : 噴出火炎から伝達される輻射熱流束 (kW/m²)
 \dot{q}_O'' : 火災室の高温気体から伝達される輻射熱流束 (kW/m²)
 r_F : 円筒形輻射面の半径 (m)
 t : 時間 (s)
 Δt : 時間刻み (s)
 z : 地表面からの鉛直方向高さ (m)

ギリシャ文字(大文字)

$\dot{\Gamma}$: 化学種の生成速度 (kg/s)
 Ψ : 壁の欠損率 (-)

ギリシャ文字(小文字)

α : 開口流量係数 (-)
 α_F : 燃焼面積の成長係数 (m²/s²)
 π : 円周率 (-)

- ρ : 密度 (kg/m³)
 σ : ステファン・ボルツマン定数 ($=5.67 \times 10^{-11}$ kW/m²K⁴)
 ϕ : 輻射熱伝達率 (kW/m²K), 総合熱伝達率 (kW/m²K)

第4章 住民による消火活動を考慮した飛び火現象の確率論的予測モデル

英字(大文字)

- B^* : 火の粉の飛散距離を規定する無次元数 (-)
 D : 火源の代表長さ (m)
 P_O : 飛び火発生確率 (-)
 \dot{Q}_B : 燃焼建物の発熱速度 (kW)
 T_B : 人体の表面温度 (K)
 T_{cr} : 確実に避難を開始する限界曝露温度 (K)
 T_∞ : 外気温度 (K)
 ΔT_p : 避難者が曝される熱気流による温度上昇 (K)
 U_∞ : 市街地風の風速 (m/s)

英字(小文字)

- c_p : 気体の定圧比熱 ($=1.0$ kJ/kgK)
 d_p : 火の粉の厚み (m)
 g : 重力加速度 ($=9.8$ m/s²)
 h : 対流熱伝達率 (kW/m²K)
 n_B : ある燃焼建物から放出される火の粉の数 (-)
 n_F : 燃焼領域から放出される火の粉の数 (-)
 p : 確率 (-)
 p_C : 可燃物の存在確率 (-)
 p_D : 火の粉が着火の危険性を有している確率 (-)
 p_E : 住民の避難開始確率 (-)
 p_F : 住民による火の粉の消火確率 (-)
 p_O : 一つの火の粉による飛び火発生確率 (-)
 p_R : 住民の滞在確率 (-)
 p_S : 火の粉の飛来確率 (-)
 \dot{q}_B'' : 人体表面から放射される熱流束 (kW/m²)
 \dot{q}_{cr}'' : 確実に避難を開始する限界熱流束 (kW/m²)
 \dot{q}_F'' : 燃焼建物から避難者に入射する熱流束 (kW/m²)
 \dot{q}_H'' : 周辺気体と人体表面の間で対流により伝達される熱流束 (kW/m²)
 \dot{q}_N'' : 正味の伝達熱流束 (kW/m²)

\dot{q}_{∞}'' : 周辺気体から放射される熱流束 (kW/m²)

t : 時間 (s)

ギリシャ文字(小文字)

α_p : 可燃物の存在確率 (-)

β_p : 可燃物の存在確率 (-)

γ_p : 火の粉の発生に関連する係数 (1/kJ)

μ : 火の粉の飛散距離の平均 (m)

ρ_p : 火の粉の比重 (kg/m³)

ρ_{∞} : 外気の密度 (kg/m³)

σ : 火の粉の飛散距離の標準偏差 (m), ステファン・ボルツマン定数 (kW/m²K⁴)

ϕ_p : 火の粉の消火に関連する係数 (-)

χ_p : 飛び火の発生に関連する係数 (1/kJ)

第 5 章 地震火災時における住民の避難先選択のモデル化

英字(大文字)

F : 累積分布関数 (-)

P : 確率 (-)

P_R : 避難場所の選択確率 (-)

S : 避難場所の敷地面積 (ha)

英字(小文字)

d : ダミー変数 (-)

s : 住民の初期位置と避難場所との直線距離 (m)

t : 在住期間 (年)

ギリシャ文字(大文字)

Θ : 閾値 (-)

$\overline{\Theta}$: 閾値の確定項 (-)

Θ' : 閾値の変動成分 (-)

Ψ : 魅力度 (-)

$\overline{\Psi}$: 魅力度の確定項 (-)

Ψ' : 魅力度の変動成分 (-)

ギリシャ文字(小文字)

α : 閾値に関連する係数 (-, 1/年, または 1/m)

第 6 章 避難性状予測モデルの検証

英字(大文字)

A_B : メッシュ内の燃焼面積 (m^2)

A_M : メッシュの面積 (m^2)

D : 火源径 (m)

ΔH_w : 木材の燃焼熱 (kJ/kg)

\dot{Q}_B : メッシュの発熱速度 (kW)

R : 避難場所までの最短経路の集合 (-)

ΔT : 避難者が曝される熱気流による温度上昇 (K)

英字(小文字)

h : 対流熱伝達率 ($\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$)

h_M : 火炎高さ (m)

l : 道路に沿った距離 (m)

\dot{m}_w'' : 木造家屋の単位建築面積あたりの質量減少速度 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

\dot{q}'' : 燃焼建物から避難者に入射する熱流束 (kW/m^2)

s : 距離 (m)

t : 時間 (s)

t_D : メッシュの燃焼が成長期から盛期へ移る時間 (s)

t_F : メッシュの燃焼が終了する時間 (s)

t_0 : メッシュの燃焼開始時間 (s)

ギリシャ文字(大文字)

Φ_o : 避難ポテンシャル (-)

ギリシャ文字(小文字)

α : 燃焼面積の成長率 (m^2/s)

π : 円周率 (-)

χ_F : 熱流束をポテンシャルに変換するための係数 (m^2/kW)

χ_P : 距離をポテンシャルに変換するための係数 (1/m)

第7章 避難シミュレーションを用いた避難安全対策の有効性評価

英字(小文字)

n_B : 建物棟数 (-)

n_H : 世帯数 (-)

n_O : 出火件数 (-)

p_C : 倒壊率 (-)

p_O : 出火率 (-)

t_E : 避難開始時間 (s)

t_F : 火災からの影響を受けて避難を開始する時間 (s)

t_I : 避難勧告・指示を受けて避難を開始する時間 (s)

ギリシャ文字(小文字)

α : 火器使用率 (-)

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

1.1.1 地震火災のリスク

都市を直撃する巨大地震時には、同時に発生する複数の延焼火災によって、多くの住民が都市全域の規模で避難を開始する事態が予想される。1923 年に発生した関東大震災当時の東京市では、地震後の大火によって 140 万人もの住民が避難を開始し、そのうちの約 65,000 人が焼死した[1]。図 1-1 は関東大震災当時の市街地の様子を上空から撮影したものであり、多数の巨大な煙によって市街地が覆われている様子が見て取れる。当時は現在のように消防力が充実しておらず、市街地には防火的に脆弱な木造建築物が密集していた。これ以後、戦災による甚大な被害の経験もあって、都市不燃化のための様々な取り組みがなされてきた。その結果、平常時には大火は殆ど見られなくなり、市街地の防火性能は着



図 1-1 関東大震災当時の航空写真

実に向上してきたと言える。しかし、1995年に発生した阪神淡路大震災は、巨大地震による大火発生のリスクが現代の市街地においても依然として潜在することを示した。幸いにも、震災発生時は火器の使用の少ない早朝であり風速も弱かったが、それでも地震後に発生した150件の建物火災のうちの44件が大規模な市街地火災へと成長し、最終的に約62haの地域、約7,000棟の建物が焼失した[2]。阪神淡路大震災における人的被害の多くは、建物の倒壊による窒息・圧死を要因としており、延焼火災による避難上の問題は比較的少なかったとされている。とはいえ、仮に地震の発生が都市活動の活発な時間帯に強風下で起こったとすれば、延焼火災の規模は拡大し、住民の避難にも甚大な影響が及んだ可能性が考えられる。

今日、東海・東南海・南海地震といった巨大地震が近い将来に高い確率で発生することが予想されており、伴って都市直下型地震の発生も危惧されている。こうした巨大地震に併発するであろう大規模火災に備えて、都市が住民に対して安全な環境を提供するためには、地震火災のリスクを許容可能な範囲に制御する必要がある。

1.1.2 地震火災の安全対策

古来より都市火災の被害を常習的に被ってきたわが国では、様々な安全対策が歴史的になされてきた。その基本的な考え方は、我々の能力を超える不測の事態の可能性を念頭においた多段階の冗長システムであり、次のように整理することができる。

- (1) 建物の難燃化・緩燃化
- (2) 火災の区画化
- (3) 消防・消火設備
- (4) 広域避難場所の配置
- (5) 避難勧告・指示

まず、建物単体の防火性能の向上を図る(1)では、建物が燃焼した場合の急激な火災成長を抑制することを目的とする。これにより、建物間の延焼に要する時間を引き延ばすことができ、消火活動や避難行動に要する時間を確保することができる。建築基準法では、防火地域や準防火地域に指定された地域内の建物構造に制限を設けることで、建物の難燃化を強制する取り決めが存在する。また、こういった法規以外の対策では、建物内部の間仕切りの補修・補強といった比較的小規模な改修によって、経済的な負担が少なく比較的容易に建物の難燃化を進める方法も考えられる。

次に(2)では、建物火災の制御に失敗した場合に備え、燃焼建物からの加熱を緩和したり加熱そのものを遮断することで、隣棟建物への延焼を防止し市街地火災への成長を抑制することを目的とする。道路の広幅員化、道路の両側に耐火建物を並べた防火路線の設定、戦時中の建物疎開による空き地の確保、震災・戦災復興時の土地区画整理といった対策が有名であり、阪神淡路大震災でも、これらに類する延焼遮断帯によって火災が焼け止まった例が報告されている[2]。このような市街地構造の改変を伴う対策は、火災に対する脆弱性を根本的に改善できる可能性が高くその効果は抜群であると言えるが、対策にかかる莫大な費用、土地・建物に対する住民などの強い権限によって、実施には困難が伴う場合が多い。

一方(3)の消火による対策は、(1,2)のような予防対策を火災発生後に応急的に補うも

のである。平常時では、大火に発展する可能性のある火災であっても、消防力によって未然に消し止められている。ただし、地震時には、消火設備や関連するシステムが損傷して、消火能力が平常時よりも低下する可能性がある。また、損傷を免れたとしても、地震火災のように複数の火災が同時に発生する場合や、既に燃焼領域が拡大した火災の場合には、火災鎮圧に投入可能な資源が分散され、機能が十分に発揮されない可能性が高い。

(4) では、(1~3) の各対策によって大火を制御できなかった場合に備え、市街地に広域避難用のスペースを確保することで、大火時の安全な避難先を提供することを目的とする。こうした対策は、関東大震災において、数十万人もの避難者がいくつかの広大な空き地に集結した経験を受けており[3]、避難場所に入りさえすれば安全が確保されるという点で効果は大きいと言える。しかし、広域避難場所の選定には、小さいものでも数 ha の規模が要求されることが多く、市街地に対する新設の難しさから、既存のオープンスペースを利用する場合が殆どである。また、避難場所の確保には現状の市街地構造の制約を受けるため、避難場所をある程度一様に提供することは難しく、地域によって安全性に偏りが生まれる可能性がある。

最後に (5) では、住民に対して延焼火災の危険が及ぶ前に避難を促すことで、避難上の安全性を向上させることを目的とする。これにより、住民が火災加熱や煙に曝される程度は減少し、安全な位置へ円滑に避難することが可能になる。こういった火災発生後の応急的な対策は、経済的・制度的な制約によって都市構造的対策が進みにくい現状を踏まえれば、最終的な防御手段として必要不可欠であると言える。しかし、地震後の火災状況の把握や、避難指示を発令する地域の判断といった対応を円滑に行うことは困難であるため、その実施には限界がある。

1.2 研究の目的

都市の避難安全性能を向上させるには、上記の対策をバランス良く組み合わせることで、地震火災の危険性を低減する必要がある。このための有効な対策を立案するには、その実施効果について合理的な評価を行える必要があるが、それには、地震火災時における住民避難の全体像を把握することが重要である。しかし、都市避難といった災害時の大規模な現象を解明するには、通常の実験手法を用いることは不可能であり、過去に発生した類似の避難事例から得られる知見も断片的であるという問題がある。このため、火災の拡大や住民の避難を適切に予測する手法の整備が必要である。

そこで本研究では、地震火災時における住民の都市避難をポテンシャルの概念に基づいてモデル化することで、多様な避難安全対策の可能性を評価可能な避難性状予測手法の開発を目的とする。

1.2.1 既往の避難性状予測手法

(1) 岡田らによる避難モデル

地震火災による都市住民の避難様相を定量的に把握し、都市の防災性能向上のための計

画立案を目的とした比較的初期の手法が岡田らによる避難モデル[4]である。岡田らは、多様な防災対策の効果を迅速に評価するため、市街地を格子状のメッシュに分割し、メッシュごとに延焼火災の拡大および避難者の移動を記述することで計算負荷の軽減を図っている。このモデルでは、ある人数の避難者を均質な属性を有する集団とみなし、その移動を流体運動によって記述する群集流の概念が採用されている（図 1-2）。例えば、メッシュ間の避難者の流動量 n は次のように表わされる。

$$n = \alpha \cdot \beta \cdot w \quad (1-1)$$

ここに、 α は群集流動係数（単位時間、単位幅あたりの通過可能な人数）、 β はメッシュ内の道路面積の割合、 w は道路幅員である。避難者は延焼火災の燃焼領域を避けて最短距離で到達可能な避難場所を目指し、避難者の滞在メッシュが延焼火災に巻き込まれた場合には避難不能になるものとされている。なお、火災拡大の予測には、過去の大火や火災データに基づいて定式化された統計式である浜田による延焼速度式[5]が利用されている。

岡田らによる避難モデルでは、避難者が時々刻々の延焼火災の様子、自治体により指定されている広域避難場所、および市街地の道路構造を完全に把握していることを仮定しており、避難者の移動が合理的な判断に基づいて行われるとしていた点で非現実的であった。そこで青木ら[6]は、避難者の情報伝達プロセスと地理的イメージの実市街地からの歪みをモデル化し、これに組み込むことでより現実的な避難モデルへと改良している。

(2) 増山らによる最遅避難モデル

地震火災時において地域住民に避難勧告・指示を発令する時間の明確な根拠を提示することを目的とした手法が増山らによる最遅避難モデル[7]である。このモデルでは、市街地

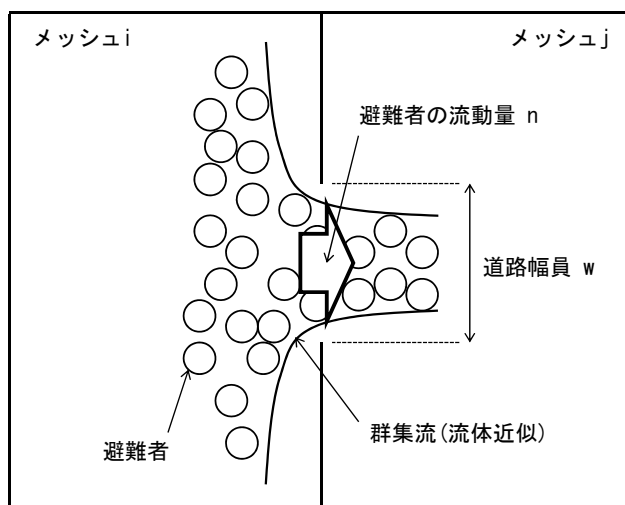


図 1-2 岡田らによる避難者の流体運動モデルの概念

を構成する道路網を避難経路ネットワークとみなし、避難者が延焼火災に巻き込まれることなく避難場所へ避難可能な限界の避難開始時間（以降では、最遅避難開始時間と呼ぶ）を理論的に導出している．図 1-3 のように避難者の初期位置と避難場所が一本の避難経路で結ばれており、延焼火災の進行によってある時間 t_F に避難経路が通行不能になる場合を考えれば、最遅避難開始時間 t_0 は次のように表わされる．

$$t_0 = t_F - \frac{x_0 - x_F}{v} - \frac{1}{v \cdot \rho \cdot w} \int_{x_F}^{x_0} p(x) dx \quad (1-2)$$

ここに、 x_0 は避難者の避難場所からの経路に沿った距離、 x_F は延焼火災によって遮断される地点の避難場所からの経路に沿った距離、 v は避難者の歩行速度、 ρ は経路上の避難者の人口密度、 w は避難経路の幅員、 p は避難経路単位長さあたりの避難者発生数である．増山らは、このような一次元空間における最遅避難モデルを二次元空間へと拡張し、避難者全員の避難開始時間の総和 Π を最大化（最遅化）することで未知パラメータを推定し、避難者の位置に応じた最遅避難開始時間を求めている．

$$\text{maximize } \Pi = \int_0^x p(x) \cdot t_0(x) dx + \int_0^y p(y) \cdot t_0(y) dy \quad (1-3)$$

(3) 三好らによる避難危険度評価モデル

三好ら[8]は、岡田らによる避難モデルに代表される燃焼領域を避けた最短経路避難の考え方に確率論的モデルを採用することで、広域避難場所の避難圏域の割り当てが避難リスクに与える変化を定量的に評価可能な手法を提案している．ここでは、町丁目の重心と広域避難場所の重心で構成される仮想的な避難経路ネットワークを仮定し、延焼火災の拡大を考慮した避難経路の通過可能確率 p を次のように表わしている．

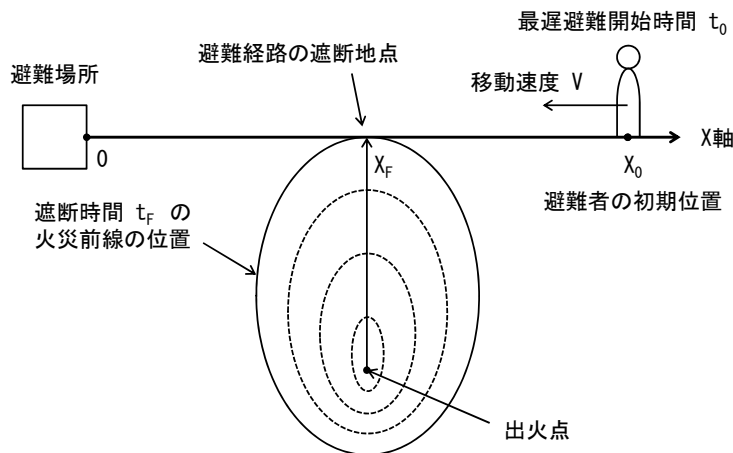


図 1-3 増山らによる最遅避難モデルの概念[7]

$$p = e^{-\rho \cdot s} \quad (1-4)$$

ここに、 ρ は出火密度（町丁目面積に対する出火点数の割合）、 s は経路を巻き込む延焼火災の出火点の範囲の面積である．避難者は広域避難場所に通じる避難経路の通過可能確率 P を最大にするように移動するものと仮定し、これを実際の木造密集市街地に適用することで避難リスクの最も小さい経路を抽出している．

$$\text{maximize} \quad P = \prod_l p_l \quad (1-5)$$

ここに、 l は町丁目と避難場所を結ぶ複数の避難経路の識別記号である．さらに、広域避難場所の収容可能人員を制約として、抽出した避難経路を基に全体の避難場所の避難人数を最大化することで、最適な広域避難場所の避難圏域の割り当て方法を推定している．このような三好らによる手法は避難者の移動を陽に定式化したものではなく、市街地構造によって定まる安全性能を評価する手法と言える．

(4) 藤岡らによる避難モデル

岡田らによる避難モデルに代表される群集流モデルの利点は、避難の全体的傾向を容易に把握できる点や計算負荷が小さい点にある．一方で、避難者の経路上での移動を追跡できないことや、個々の避難者の特性の違いを考慮することができないという問題があった．地震火災時には、火災に巻き込まれ避難不能となった住民、避難場所に避難した住民、避難者の誘導を行う要員といった多様な属性を持つ人々が自律的な行動をとると同時に、これらの間で情報伝達といった相互作用が働くため、人間単体に着目した予測手法が必要となる．このような背景の下、藤岡ら[9]は、個々の避難者を粒子とみなしその行動を時間ごとに記述する手法を提案している．このモデルでは、市街地の道路網を避難経路ネットワークとみなし、個々の避難者は経路上をそれぞれの身体能力に応じた速度で避難先を定めながら移動する．経路の交差点に到達した避難者は、避難先までの経路の情報や周囲の避難者から受ける情報を判断しながら避難経路を選択し、再び経路上を移動する．藤岡らによる避難モデルは、こうした個々の避難者の一連の行動を連鎖させることで避難者全体の予測へとつなげる手法と言える．

1.2.2 新しい避難性状予測手法

これまでに提案されてきた避難性状予測手法は、そのほとんどが、

- 避難者の避難不能要因を延焼火災による巻き込みに限定する
- 避難者の避難先とその経路の最適解を計算する

といった共通の特徴を持っている．こうした手法の利点は、火災の時間変化さえ把握すれば、避難者の移動経路や避難不能を比較的簡便に評価可能な点にある．しかし、市街地が曝される危険度に応じた移動が定式化されていないため、モデルの合理性に欠けるという問題があった．例えば、強風下の都市避難では、燃焼領域から発生する熱気流が市街地を

這うように流れるため、避難者はその熱や有毒ガスに曝されることになる。こうした現象は避難者の移動方向と避難の成否を左右する一つの要因と考えられる。

そこで本モデルでは、避難者の移動のモデル化にポテンシャルの概念を導入し、市街地の危険度に応じてその移動方向を予測する。ここでのポテンシャルの概念とは、火災や避難場所といった避難性状を支配する複数の要因の影響を、時間に応じて変化しながら市街地に分布するポテンシャルとして評価し、ポテンシャルの高い地点から低い地点に向かって避難が行われると考えるものである。こういったポテンシャルの考え方は、火災時の建物内避難の予測にも利用されており、そこでは、内部空間をメッシュに分割することで連続的なポテンシャル空間が評価されている[10,11]。本モデルでは、市街地の道路ネットワークを避難経路とみなし、メッシュ分割に基づいた既往のポテンシャル手法を道路ネットワークに拡張することで、ネットワークに拘束された避難者の移動を予測する。

図 1-4 は本モデルの概念を示したものである。ここでは、避難性状を支配する要因に、

- (1) 燃烧建物からの輻射と熱気流
- (2) 市街地の避難場所

の二つを考え、これらによる影響を（Ⅰ）火災危険度ポテンシャル、（Ⅱ）心理危険度ポテンシャル、として個別に評価した後合成することで、避難者の移動指標となる総合的なポテンシャル場を構築する。このとき、避難性状予測モデルは次の三つのサブモデルを統合したモデルとなる：

- (A) 火災危険度ポテンシャル評価モデル
- (B) 心理危険度ポテンシャル評価モデル
- (C) 避難者の行動モデル

(1) 火災危険度ポテンシャル評価モデル

地震火災時には、避難者が燃烧建物からの輻射や熱気流に曝されることを踏まえ、これ

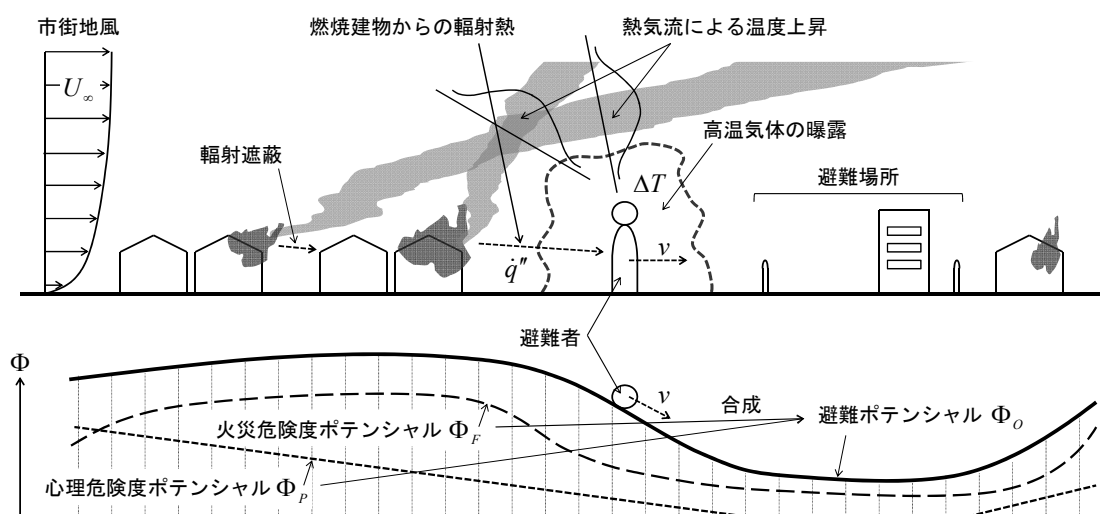


図 1-4 新しい避難性状予測モデルの概念

らによる影響を火災危険度ポテンシャルとして評価する。燃焼建物からの輻射については、燃焼建物内の高温ガスと開口部から噴出する火炎を熱源と考える。避難者に伝達される輻射熱は熱源からの距離をもとに計算し、市街地に並ぶ建物によって輻射熱が遮蔽される場合も考慮する。一方の熱気流については、既往の相似則を利用して温度上昇を予測する。有風下では、熱気流が市街地風に吹き倒されることで風下側に離れた避難者にもその影響が及ぶが、このときの避難者周りの温度上昇を気流軸からの距離をもとに算出する。なお、都市火災時には複数の建物が燃焼することで熱気流が合流することになるが、ここでは個々の熱気流による影響を重ね合わせることで温度上昇を予測する。

(2) 心理危険度ポテンシャル評価モデル

地震火災時の避難者は、延焼火災から身を守るため、広域避難場所といった安全な空間に向かって移動することになる。ここでは、こういった避難先への移動を表現するためのポテンシャル場を構築する。ポテンシャルの値は避難先で最小値をとるものとし、避難先から離れるほど増加するものとする。このため、ここでのポテンシャルは、避難者が市街地に対して考える心理的な危険度と読み換えることができる。心理危険度ポテンシャルを計算するには、地震火災時において住民が考える避難先を把握する必要がある。ここでは、京都市住民に対して実施したヒアリング調査の結果から、広域避難場所の選択モデルとして確率論的な定式化を行っている。

(3) 避難者の行動モデル

本モデルでは、個々の避難者の行動を時間ごとに記述することで、避難者全体の予測へとつなげる手法を採用する。住民は延焼火災からの危険性に応じて避難を開始するものと考え、燃焼建物からの輻射と熱気流によって定まる避難開始確率としてモデル化する。その後の避難者の移動については、予め評価しておいた火災危険度ポテンシャルと心理危険度ポテンシャルを合成した総合ポテンシャル場を考える。避難者は総合ポテンシャルの勾配の大小に応じて確率的に経路を選択しながら、ポテンシャルの高い地点から低い地点に向けて道路ネットワーク上を移動する。その間、避難者は熱気流といった高温気体に曝されることになるが、その温度累積量と許容量に基づいて避難の不能を判定する。累積量の計算には、高温気体の曝露温度と限界時間に関する既往の関係式を利用し、許容量を既往の火災死亡データから推定する。避難者は、曝露された温度累積量が許容量を超える前に避難場所に到達できれば、避難が完了するものとする。

(4) ポテンシャルの概念に基づく避難モデルの特徴

本研究で開発する避難モデルでは、都市避難という大きな枠組みの現象を、延焼火災からの危険度や避難者の心理的な危険度といった避難性状を支配する要因と、避難の開始・移動・経路選択・避難不能といった支配要因に基づく行動モデルに分解し、これらをポテンシャルという仮想的な概念を用いて個別に定式化するアプローチをとる。こうしたポテンシャルモデルの利点をまとめると次のようになる。

- 避難者の移動メカニズムが危険度によってモデル化されるため、多様な安全対策の効果を評価しやすい
 - 避難者の移動方向にその地点のポテンシャル勾配を考えるため、火災の全体像ではなく避難者の比較的近辺の環境に依存した移動が表現され、モデルの合理性を確保することができる
 - 都市避難全体だけでなく、個別の現象レベルでもモデルの検証が可能となる
 - 新たな知見の蓄積を待って追加的にモデルの予測機能を拡張することができる
- ただし、こうした利点に伴って、
- モデルが複雑化することで計算負荷が増大する
 - モデルの機能に応じて詳細な入力データが必要となる
- といった課題も発生する。このため、上記の利点を生かしつつも可能な限り簡便なモデルを導入し、欠点を最小化した定式化を行うことが必要となる。

1.3 本研究の構成

図 1-5 は本研究の構成を示したものである。本研究の基幹となる避難性状予測モデルについては、第 2 章に記述した。続く、第 3, 4, 5 章では、避難モデルで利用されるサブモデルの定式化を行い、これを過去の火災事例の調査結果、もしくはヒアリング調査の結果を用いて検証した。残る第 6, 7 章では、避難モデルを過去の火災事例に適用することで全体的な予測精度について検討を加えた後、実在の市街地における避難シミュレーションを行うことで避難安全対策の効果に関するケーススタディを行った。

第 2 章 ポテンシャルの概念に基づく避難性状予測モデル

1.2.2 項を参照

第 3 章 計算負荷の軽減を重視した市街地火災の物理的延焼モデル

将来起こり得る地震火災を想定して住民の都市避難を予測するには、燃焼建物からの輻射と熱気流の影響を計算する必要があるが、このためには燃焼領域の時間変化を入力条件として与える必要がある。これまでにも、市街地火災の拡大性状を現象の物理的知見に基づいて予測する手法が整備されている。ただし、モデルの合理化によって計算に必要な時間や情報量が増大し、最大でも平常時大火といった数千棟規模の火災にしか適用できないという問題がある。巨大地震時には、複数の火災が都市の広い範囲で同時に発生する可能性があるため、計算上取り扱う必要のある建物数は、平常時大火の数千棟から数十万棟の規模に膨れ上がることになる。このため、既往の延焼モデルを地震火災のような都市スケールの現象に適用することは難しく、たとえ適用できたとしても、計算には莫大な時間が掛かることになる。

こうした課題に対し、第 3 章では、情報量の軽減と計算速度の高速化のための新たなアルゴリズムを既往の物理的延焼モデルに導入することで、都市規模の避難シミュレーショ

ンに利用可能な延焼サブモデルへと改良した。なお、既往の物理的延焼モデルでは、これを構成する部分的なモデルの予測精度が火災実験等により検証されているため、ここでの改良モデルは基本的にこの考え方を踏襲する。改良モデルの全体的な予測精度や計算負荷の低減度は、酒田市大火の延焼シミュレーションを行い、当時の調査報告や既往の延焼モデルと比較することで検証している。

第4章 住民による消火活動を考慮した飛び火現象の確率論的予測モデル

第3章では、避難性状予測モデルの入力条件として必要な燃焼領域の時間変化を火災拡

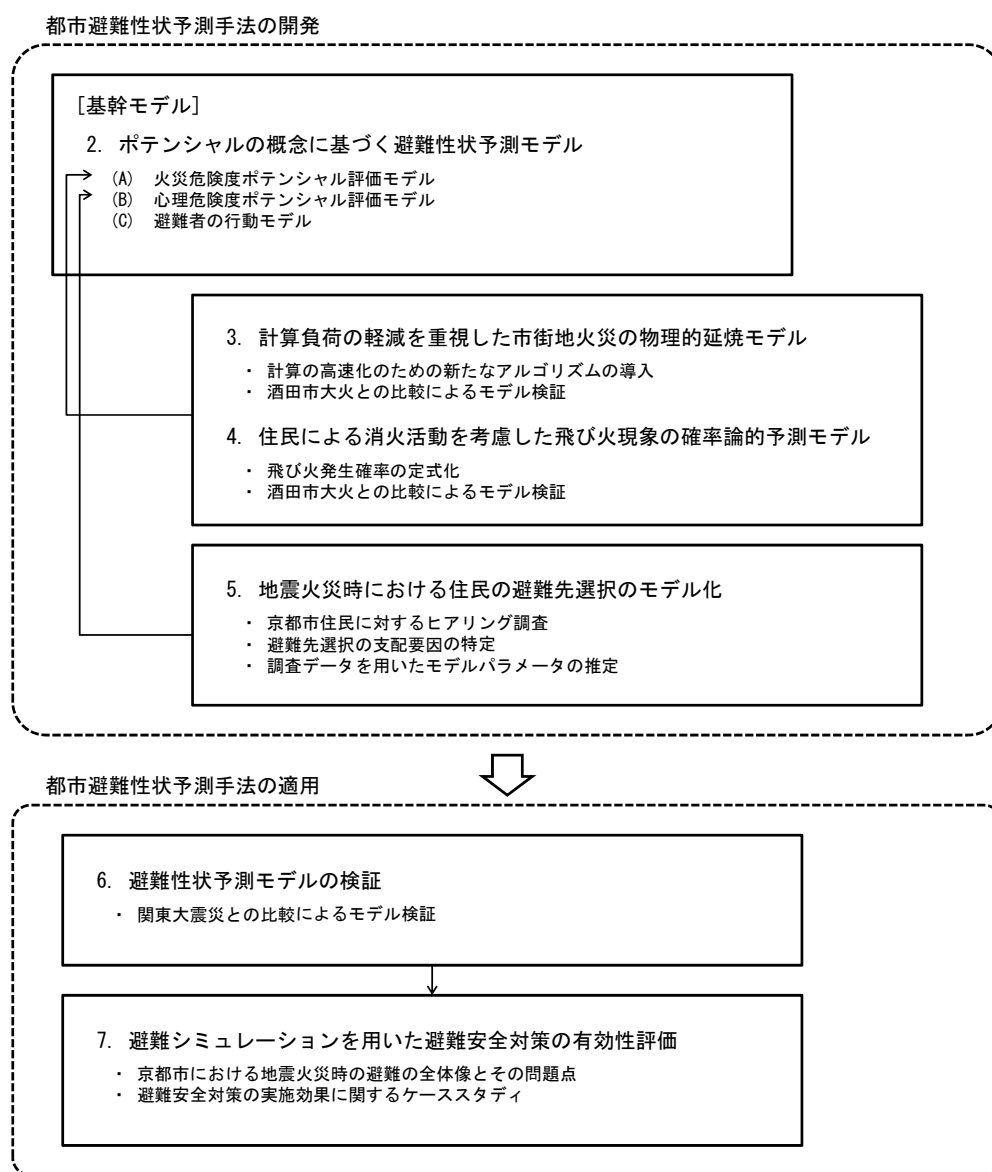


図1-5 本研究の構成

大の物理的知見に基づいて予測可能な手法を整備した。この中では、建物間の火災拡大現象を支配する要因として、(1) 燃焼建物からの輻射、(2) 燃焼建物の風下側に形成される熱気流、の二つを考えているが、市街地風によって飛散する火の粉（飛び火）については、物理的な知見の不足により定式化を行えなかった。一般的に、市街地火災の拡大性状は気象条件に大きく左右されることが知られており、中でも、強風下の飛び火現象は燃焼領域の急拡大をもたらすものと考えられている。このため、避難性状の予測にあたっては、飛び火現象の合理的なモデル化は避けて通れない。

そこで第 4 章では、火の粉に関する物理的知見の不足を踏まえ、飛び火による延焼の発生を確率論的に評価する手法を開発した。ここでは、一つの火の粉に着目した飛び火シナリオを、火の粉の飛散距離や周辺住民による消火活動といった要素で構築した後、燃焼領域から発生する複数の火の粉の影響下での延焼確率へと拡張した。こうした飛び火モデルの再現性は、酒田市大火の延焼シミュレーションを行い、市街地全体での飛び火の発生数や延焼速度といった巨視的な指標を調査報告と比較することで検証している。

第 5 章 地震火災時における住民の避難先選択のモデル化

1923 年に発生した関東大震災では、数十万人もの避難者が上野公園や皇居前広場といったいくつかの広大な空き地に避難した例が報告されている[3]。このことは、市街地に分布するオープンスペースの間で、避難空間として潜在的に避難者を引き付ける程度（以降では、魅力度と呼ぶ）に差がある可能性を示しているが、将来起こり得る地震火災シナリオを想定して避難の全体像を精度良く予測するには、こういった避難場所の魅力度の偏りによる影響を避難性状予測モデルに組み込む必要がある。

地震火災時において住民が考える避難先については、これまでもいくつかの研究がなされており、調査対象地域の住民の避難先やその決定要因に関する基礎資料が提示されている。しかし、避難場所の魅力度に起因した避難先の決定構造については十分な検討がなされておらず、提示されたデータが避難モデルを用いた予測計算には利用できないという問題があった。このことから、避難場所の魅力度を考慮して住民の避難先を合理的に予測可能な手法の開発が必要となる。

そこで第 5 章では、京都市住民に対してヒアリング調査を実施することで、京都市広域避難場所の魅力度を考慮した住民の避難先選択のモデル化を行った。ここでは、京都市の一部の地域で実施したヒアリング調査の結果から避難先選択を支配する要因を把握し、その支配要因に基づいて確率論的な定式化を行っている。また、避難先選択モデルに含まれるパラメータは、ヒアリング調査から得られたデータを利用することで推定している。

第 6 章 避難性状予測モデルの検証

第 6 章では、過去の地震火災において大規模な避難が行われた関東大震災に着目し、避難シミュレーションによる計算結果と当時の調査報告を比較することで、避難性状予測モデルの全体的な予測精度について検証した。なお、計算の入力条件として必要な燃焼領域の時間変化は、当時の市街地を構成する建物群の詳細な情報が残存していないことを踏まえ、調査から作成された延焼動態図を基に火災を再現した。検証にあたっては、主に避難

不能者の発生数やその発生箇所といった点から，調査報告との比較を行っている．

第7章 避難シミュレーションを用いた避難安全対策の有効性評価

地震火災に対して避難上の問題を抱える都市部では，何らかの対策を講じて避難安全性の向上を図る必要がある．第7章では，避難モデルを現代の京都市に適用し，将来の発生が予想される直下型地震を想定して避難シミュレーションを行うことで，京都市で起こり得る避難の全体像とその問題点を把握した．さらに，避難上の被害を抑制するための多様な対策の中から，避難開始の早期化や避難先の指示といった火災発生後の応急的な対策を選択し，その効果を定量的に把握することで対策の可能性について考察した．

参考文献

- [1] 諸井孝文・武村雅之: 関東地震(1923年9月1日)による被害要因別死者数の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.4, No.4, pp.21-45, 2004.9
- [2] 日本火災学会: 1995年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書, 1996
- [3] 中央防災会議: 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 1923 関東大震災, 2006.7
- [4] 岡田光正・吉田勝行・柏原士郎・辻正矩: 大震火災による人的被害の推定と都市の安全化に関する研究-(1) 延焼過程を組み込んだ避難シミュレーションシステムの設計-, 日本建築学会論文報告集, No.275, pp.141-148, 1979.1
- [5] 浜田稔: 火災の延焼速度について, 火災の研究I, 1951
- [6] 青木義次・大佛俊泰・橋本健一: 情報伝達と地理イメージ変形を考慮した地震時避難行動シミュレーションモデル, 日本建築学会計画系論文報告集, No.440, pp.111-118, 1992.10
- [7] 増山格・梶秀樹: 大地震時広域避難計画検討のための最遅避難モデルの開発, 日本都市計画学会学術研究論文集, No.19, pp.379-384, 1984
- [8] 三好孝典・松下義男・橋本済・糸井川栄一・村尾修: 出火・延焼のリスクを考慮した広域避難計画に関する研究, 地域安全学会論文集, No.10, pp.105-112, 2008.11
- [9] 藤岡正樹・石橋健一・梶秀樹・塚越功: 津波避難対策のマルチエージェントモデルによる評価, 日本建築学会計画系論文集, No.562, pp.231-236, 2002.12
- [10] 横山秀史・目黒公郎・片山恒雄: 避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用, 土木学会論文集, No.513, pp.225-232, 1995.4
- [11] 水野雅之他: 建物火災時の避難安全性評価シミュレーションプログラムの開発 その 1～3, 平成 17 年度研究発表会梗概集, 日本建築学会

第 2 章

ポテンシャルの概念に基づく避難性状予測モデル

2.1 はじめに

本研究で扱う避難モデルでは，避難者の移動の定式化にポテンシャルの概念を導入し，市街地の危険度に応じてその移動方向を予測する（図 2-1）．ここでのポテンシャルの概念では，火災や避難場所といった避難性状を支配する複数の要因の影響を，時間に応じて変化しながら市街地に分布するポテンシャルとして評価し，ポテンシャルの高い地点から低い地点に向かって避難が行われると考える．本モデルでは，避難性状を支配する要因に，

- (1) 燃烧建物からの輻射と熱気流
- (2) 市街地の避難場所

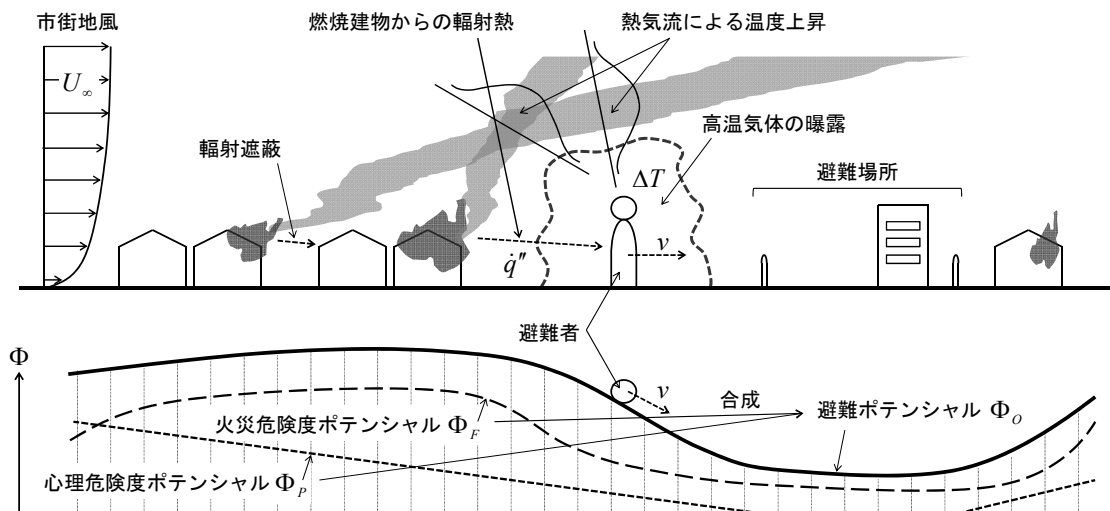


図 2-1 ポテンシャルの概念に基づく避難性状予測モデルの概念

の二つを考え、これらによる影響を（Ⅰ）火災危険度ポテンシャル、（Ⅱ）心理危険度ポテンシャル、として個別に評価する．このとき、避難性状予測モデルは次の三つのサブモデルを統合したモデルとなる：

- (A) 火災危険度ポテンシャル評価モデル
- (B) 心理危険度ポテンシャル評価モデル
- (C) 避難者の行動モデル

本章では、こうした個々のサブモデルの定式化を行う．

まず火災危険度ポテンシャル評価モデルでは、避難者が曝される熱環境の厳しさを燃焼建物からの輻射と熱気流をもとに記述する．具体的には、避難者が受ける輻射熱流束と熱気流による温度上昇を計算し、これらを火災危険度ポテンシャルに変換する．次に心理危険度ポテンシャル評価モデルでは、広域避難場所といった市街地の安全な空間に向けた移動を表現するためのポテンシャル場を構築する．ポテンシャルの値は避難先で最小値をとるものとし、避難先から離れるほど増加するものとする．このため、ここでのポテンシャルは、避難者が市街地に対して考える心理的な危険度と読み換えることができる．

避難者の移動を予測するにあたっては、このように評価された二種類のポテンシャルを次のように合成することで、避難者の移動指標となるポテンシャル場を形成する．

$$\Phi_o = \Phi_F + \Phi_p \quad (2-1)$$

ただし、 Φ_o は避難ポテンシャル、 Φ_F は火災危険度ポテンシャル、 Φ_p は心理危険度ポテンシャルである．避難者の行動モデルでは、個々の避難者が避難ポテンシャル Φ_o の勾配の大小に応じて確率的に経路を選択しながら、ポテンシャルの降下方向へ道路ネットワーク上を移動する．その後、避難者は最終的な避難先に到達した時点で避難を完了するものとする．ただし、移動中の避難者は熱気流といった高温気体に曝露されることから、避難先へ逃げ込むまでの間に、曝露気体の温度累積量がその許容量を超えた場合には避難不能になるものとする．

2.2 火災危険度ポテンシャル評価モデル

地震火災時の避難者は、燃焼建物からの輻射や熱気流に曝されることになる．このうち、燃焼建物内部のガスや開口部から噴出する火炎からの輻射熱は、熱源温度（K）の四乗に比例する強い加熱によって避難者の行動を制限する．一般的な火災温度を 1000℃（1273K）程度とすると、火災室から放出される単位面積あたりの輻射熱エネルギーは約 150kW/m² となり、同じ熱源から対流によって伝達されるエネルギー（10～30kW/m²）に比べて大きい．ただし、多くの建物が密集して建ち並ぶ市街地では、輻射熱の伝達経路に遮蔽物が存在することも多いため、輻射による危険性は燃焼建物から比較的狭い範囲に限定される．一方、燃焼建物から発生する熱気流は、市街地風に吹き流されることで、風下側にある程度離れた避難者にもその高熱と煙毒の影響が及ぶことになる．熱気流の温度と煙濃度は、熱源からの距離の増加に伴い新鮮空気の希釈によって徐々に低下していくという共通のメカニズム

ムを持つ。このため、熱気流の加害性は気体温度といった熱的影響で代表させることができるが、その温度上昇は $10^1 \sim 10^2 \text{K}$ のオーダーであり、避難者の行動を制限するには十分な大きさである。

そこで本モデルでは、燃焼建物からの輻射熱流束と熱気流による温度上昇をもとに避難者が曝される熱環境の厳しさを表現し、これを次のように火災危険度ポテンシャル Φ_F に変換する。

$$\Phi_F = \chi_F \cdot (\dot{q}'' + h \cdot \Delta T) \quad (2-2)$$

ただし、 \dot{q}'' は燃焼建物から避難者に入射する輻射熱流束、 ΔT は避難者が曝される熱気流による温度上昇、 h は人体の対流熱伝達率、 χ_F は熱流束をポテンシャルに変換する定数である。なお、輻射熱流束や温度上昇の計算には、発熱速度 \dot{Q} といった火災の燃焼規模を把握する必要があるが、基本的には第 3 章に記述する延焼モデルを利用することとし、その内容については後述する。

2.2.1 燃焼建物からの輻射熱伝達

ここでは、避難者に対する輻射源として、(1) 燃焼建物内部のガスと、(2) 開口部から噴出する火炎を考える (図2-2)。こういった輻射源から避難者へ入射する熱量は、輻射源と避難者との間の幾何学的な関係からなる形態係数に依存するが、建物が密集する市街地ではこの関係は極めて複雑であり、形態係数の計算には大きな負荷が強られる。そこで本モデルでは、何らかの空間的な広がりを持った輻射源を一点で代表させることで、計算の簡略化を図る。このとき、代表点から放射される熱流束が方向によらず一様であるものと仮定すると、輻射源から避難者に入射する熱流束 \dot{q}'' は次のように表わされる。

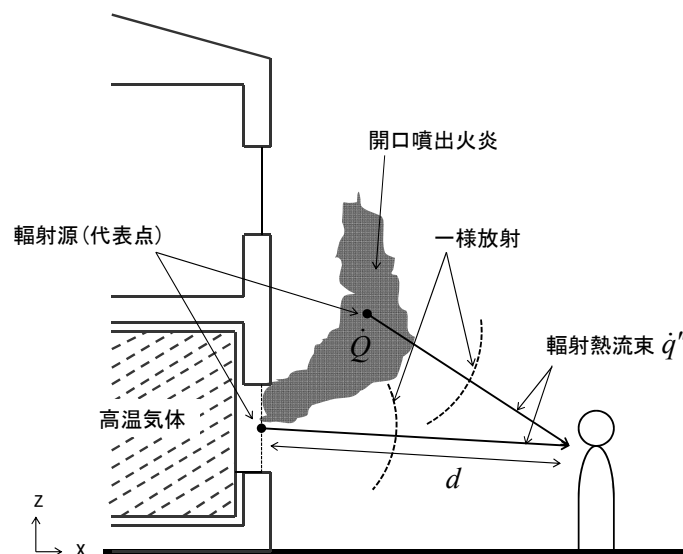


図 2-2 燃焼建物からの輻射熱伝達

$$\dot{q}'' = \frac{0.3\dot{Q}}{4\pi d^2} \quad (2-3)$$

ただし、 \dot{Q} は輻射源が保有する単位時間当たりの熱量、0.3は輻射源の保有熱量のうち放射によって消費される割合[1]、 π は円周率、 d は輻射源と避難者との距離である。なお、輻射源と避難者を黒体とみなした。

2.2.2 複数の熱気流による温度上昇

地震火災では、規模の異なる複数の建物が同時に燃焼するため、これらを熱源とする熱気流は基本的に燃焼建物の数だけ存在する。その結果、燃焼領域の風下側に位置する避難者は、これらの複数の熱気流の重複した影響を受けることになる。ここでは、各熱源から発生する熱気流による温度上昇を個別に評価しておき、その後合成することで、風下側の避難者が曝される熱気流の影響を計算する（図2-3）。

(1) 熱気流の温度上昇

燃焼領域から発生する熱気流は市街地風を受けて吹き倒されることが多い。しかし、このことが気流の巻込み性状に与える効果については、既往の研究からは明らかではない。そこで、このような市街地風の影響を無視し、熱源からの気流軸に沿った温度上昇 ΔT_0 を無風時における点熱源上の温度上昇で近似する[2]。

$$\Delta T_0 = \begin{cases} 900 & (\xi/\dot{Q}^{2/5} < 0.08) \\ 72(\xi/\dot{Q}^{2/5})^{-1} & (0.08 \leq \xi/\dot{Q}^{2/5} < 0.2) \\ 24(\xi/\dot{Q}^{2/5})^{-5/3} & (0.2 \leq \xi/\dot{Q}^{2/5}) \end{cases} \quad (2-4)$$

ここに、 ξ は軸上の熱源からの高さ、 \dot{Q} は熱源が保有する単位時間当たりの熱量である。

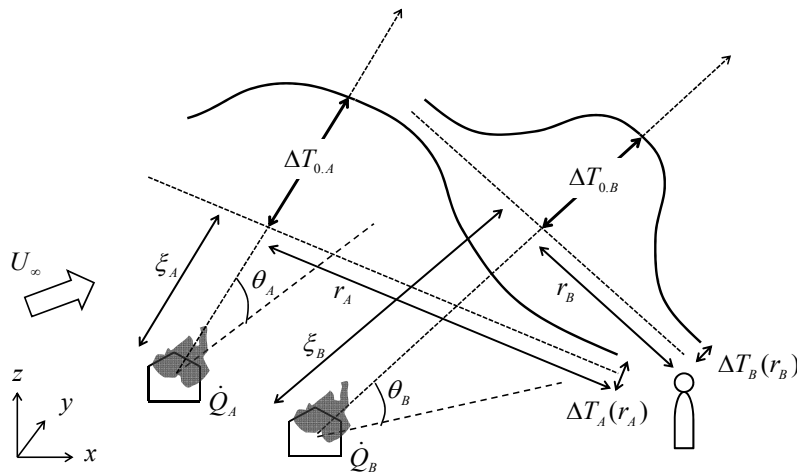


図2-3 複数の熱気流による温度上昇

ただし、熱気流が市街地風に吹き倒される場合には、 ξ を気流軸に沿った熱源からの長さとする。

式 (2-4) は、熱源からの距離 ξ が増加するにつれて熱気流と周辺空気との混合が起こり、気流軸上の温度が低下する関係を表わしている。この関係を用いることで気流軸上の任意の高さにおける温度上昇を調べることができるが、曝露対象となる避難者は気流軸からある程度離れた位置に存在することが多い。そこで、気流軸に直角な方向の温度上昇分布を知る必要があるが、鉛直方向に上昇する熱気流については、水平方向の温度上昇が正規分布で近似できることが知られている。ここでは、気流軸が市街地風によって傾く場合も同様に、気流軸に直角な方向の温度上昇分布を正規分布で表わすこととし、気流軸からの距離が r の位置における温度上昇 $\Delta T(r)$ を次式で与える。

$$\frac{\Delta T(r)}{\Delta T_0} = \exp \left\{ -\beta \left(\frac{r}{l} \right)^2 \right\} \quad (2-5)$$

ここに、 $l(\cong 0.1\xi)$ は熱気流の半値幅、 $\beta(\cong 0.9)$ は温度拡散と運動量拡散に関する半値幅の比である[3]。

(2) 熱気流の傾き

地震火災時に強い市街地風が吹けば熱気流は吹き倒され、気流軸と避難者との距離は狭められる。上式 (2-5) の関係から明らかなように、気流軸に近いほど温度上昇は大きいいため、避難者はより高温の熱気流に曝されることになる。一般的に、熱気流が市街地風に吹き流される場合の気流軸の傾きは、市街地風の風速と熱源の発熱速度に強く依存することが知られている。これまでに定式化した熱気流の温度上昇は燃焼建物を点熱源とみなすことでモデル化を行ってきたが、市街地での延焼がある程度進行するとその燃焼領域が帯状に広がることに着目し、ここでは、気流軸の傾き角 θ に横井[4]による有風下の線熱源の結果を採用する。

$$\tan \theta = 0.1\Omega^{-3/4} \quad (2-6)$$

ただし、 Ω は次式で表わされる無次元風速である。

$$\Omega = U_\infty / \left(\frac{\dot{Q}'g}{\rho_\infty c_p T_\infty} \right)^{1/3} \approx 3.3 \left(\frac{U_\infty}{\dot{Q}'^{1/3}} \right) \quad (2-7)$$

ここに、 U_∞ は市街地風速、 \dot{Q}' は熱源の単位長さあたりの発熱速度、 g は重力加速度、 ρ_∞ は外気の密度、 c_p は気体の定圧比熱、 T_∞ は外気温である。

(3) 気流軸と避難者の距離

上式 (2-5) を用いて風下側の避難者が曝される熱気流の温度上昇を計算するには、気流軸と避難者の位置関係を求める必要がある。ここでは、燃焼建物の重心を原点 O とした三次元座標系を導入し、原点 O に対する避難者の位置ベクトルを \mathbf{Q} 、避難者から気流軸におろした垂線の足の位置ベクトルを \mathbf{P} とする (図 2-4)。このとき、原点 O から \mathbf{P} までの距離が気流軸上高さ ξ に、 \mathbf{P} から \mathbf{Q} までの距離が気流軸からの距離 r に相当する。

市街地風の単位風向ベクトルが $\mathbf{U} = (\cos \alpha, \sin \alpha, 0)$ 、気流軸の傾きが θ で与えられる時、気流軸の単位方向ベクトル \mathbf{T} は次のように表される。

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ \tan \theta \end{pmatrix} \quad (2-8)$$

このとき、避難者から気流軸におろした垂線の足の位置ベクトル \mathbf{P} は、

$$\mathbf{P} = \xi \mathbf{T} \quad (2-9)$$

ここで、気流軸の単位方向ベクトル \mathbf{T} と \mathbf{P} から \mathbf{Q} に至るベクトル \mathbf{PQ} は直交するため、次の関係が成り立つ。

$$(\mathbf{Q} - \mathbf{P}) \cdot \mathbf{T} = (\mathbf{Q} - \xi \mathbf{T}) \cdot \mathbf{T} = 0 \quad (2-10)$$

これを \mathbf{T} が単位ベクトルであることに注意して解けば、軸上高さ ξ が次のように求まる。

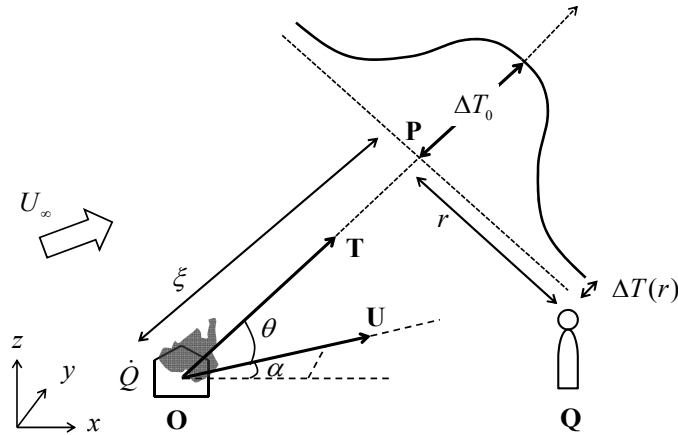


図 2-4 気流軸と避難者の位置関係

$$\xi = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{T} = \frac{q_x \cos \alpha + q_y \sin \alpha + q_z \tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} \quad (2-11)$$

ただし，避難者の位置ベクトル \mathbf{Q} の座標成分を (q_x, q_y, q_z) とした．

一方，気流軸と避難者の距離 r は次のように表わされる．

$$r = |\mathbf{Q} - \mathbf{P}| = \sqrt{|\mathbf{Q}|^2 - 2\mathbf{Q} \cdot \mathbf{P} + |\mathbf{P}|^2} \quad (2-12)$$

これに式 (2-9, 2-11) を代入すると，気流軸と避難者の距離 r が次のように書き換えられる．

$$r = \sqrt{|\mathbf{Q}|^2 - \xi^2} = \sqrt{(q_x^2 + q_y^2 + q_z^2) - \xi^2} \quad (2-13)$$

(4) 複数の熱気流による影響

複数の熱気流が合流した場合，相互に影響を及ぼしあって熱気流の性状が変化することが予想されるが，この点に関する研究は十分になされていない．そこで，熱気流の温度性状自体は近接する他の熱気流の影響を受けないものと仮定する．このとき，ある受熱点が受ける複数の熱気流による温度上昇 ΔT は，次のような重ね合わせの関係で表される[5]．

$$\Delta T = \left(\sum_{i=1}^n \Delta T_i^{3/2} \right)^{2/3} \quad (2-14)$$

ここに， i は熱源の識別記号， n は燃焼建物数， ΔT_i は熱源 i からの熱気流による温度上昇である．式 (2-14) の関係は，複数の熱源が十分近くに位置する場合，および十分離れて位置する場合の両極端の場合には，ほぼ厳密に成立することが理論的に推定される．一方，それらの中間的な場合については理論的な推定が困難であるが，二つの熱源を想定した既往実験の結果からこの関係の妥当性が確認されている[5]．

2.3 心理危険度ポテンシャル評価モデル

地震火災時の避難者は，延焼火災による巻き込みや輻射・熱気流といった危険要因から身を守るため，広域避難場所といった安全であると考えられる空間に向かって移動することになる．ここで定式化する心理危険度ポテンシャル Φ_p は，こうした避難先への移動を表現するために便宜的に構築する概念である．このモデル化にあたっては，理想流体の二次元流れにおいて，その方向と速度が速度ポテンシャルによって与えられることに着目し，流体力学的な考え方を道路ネットワーク上の人間の移動現象に置き換えることで，心理危険度ポテンシャルの計算式を導出する．

2.3.1 支配方程式の導出

一般的に、二次元座標系 x - y を流れる理想流体では速度ポテンシャル ϕ が存在し、流速 u, v がその勾配で与えられることが知られている（図 2-5）。

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (2-15)$$

ここに、 u は x 軸方向の流速、 v は y 軸方向の流速である。そこで、道路ネットワーク上の避難においてもポテンシャル Φ が経路に沿って分布し、避難者の移動速度 U がその勾配で与えられるものと仮定する。

$$U = \frac{\partial \Phi}{\partial l} \quad (2-16)$$

ここに、 l は避難場所に近づく方向を正として道路に沿って定義した軸である。ただし、本来の避難者の移動速度はこのようなポテンシャルの勾配量で定まる訳ではなく、避難者周辺の歩行者状況に依存することから、ここでの移動速度 U は物理的な意味を持たない。そこで、移動速度 U を避難者が l 軸の正の方向（避難場所に近づく方向）を心理的に指向する程度と読みかえ、一定値をとるものと仮定する。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial l} = -\chi_p < 0 \quad (2-17)$$

ただし、 χ_p は正の定数である。本モデルでは、ポテンシャルの降下方向に向けて避難者が移動することを仮定するため、上式の左辺は負の値となる。ここで、避難者が l 軸方向（避

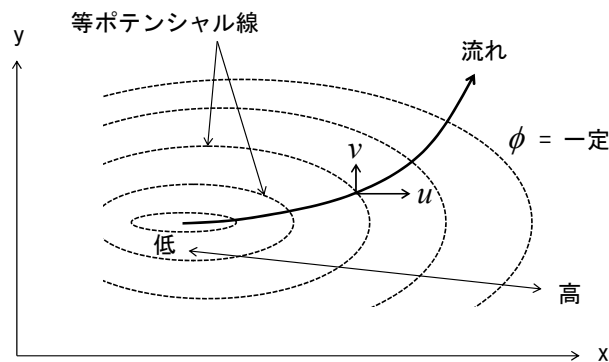


図 2-5 二次元流れと速度ポテンシャル

難場所に近づく方向) に微小距離 dl を移動したとすると、ポテンシャルの変化量 $\Delta\Phi$ は次のように表わされる。

$$\Delta\Phi \approx \frac{\partial\Phi}{\partial l} dl = -\chi_p dl \quad (2-18)$$

本モデルでは、変化量 $\Delta\Phi$ を避難者が距離 dl を移動することによって感じる心理的な安全性、 $-\Delta\Phi (= \chi_p dl)$ を心理的な危険性と定義することにする。ポテンシャルの値が Φ の地点にいる避難者が避難場所へ移動するにあたっては、そこへ移動することで感じる心理的な危険性が最小になるような経路群を選好するものと仮定すると、避難場所におけるポテンシャルの値を Φ_0 として、次の関係が成り立つ。

$$\Phi - \Phi_0 = \chi_p \sum_{i \in R} l_i \quad (2-19)$$

ここに、 i は道路の識別記号、 l は道路の長さ、 R は避難場所までの $\sum l_i$ を最小にする道路群の集合である。このとき、ポテンシャル Φ_0 の値が避難場所によらず 0 と仮定すると、心理危険度ポテンシャル Φ_p は次のように表わされる。

$$\Phi_p = \chi_p \sum_{i \in R} l_i \quad (2-20)$$

なお、式 (2-20) を用いてポテンシャル Φ_p を計算するには、 $\sum l_i$ を最小にする経路集合を求める必要があるが、ダイクストラ法を利用することで計算可能である[6]。

2.3.2 避難者の考える避難先

式 (2-20) を用いて心理危険度ポテンシャルを計算するには、市街地の避難場所を境界条件として与える必要がある。ただし、住民が市街地に分布する全ての避難場所を避難先の候補として考えることは殆どないことから、境界条件となる避難場所はその数が限定されることになる。地震火災時に住民がどこを目指して避難するかは、関東大震災において、数十万人もの避難者がいくつかの広大な空き地に集中した例[7]からも、避難場所が潜在的に避難者を引き付ける力（以降では、魅力度と呼ぶ）の偏りによる影響を受けている可能性が考えられる。本モデルでは、(I) 避難場所が潜在的に有する「魅力度 Ψ 」、(II) 住民が避難先の候補として考えるための「閾値 Θ 」、の二種類の仮想的な概念を仮定し、住民 i が避難場所 j を避難先の候補として考える確率 p_r を次のように表わす (図 2-6)。

$$p_r = \frac{1}{1 + \exp[-(\Psi_j - \Theta_{ij})]} \quad (2-21)$$

ここでの魅力度 Ψ_j は、避難先の決定構造を数学的に取り扱うための便宜的な概念であり、個々の避難場所 j が固有の値を持つ。式 (2-21) は、魅力度 Ψ_j の値が大きいほど、または閾値 Θ_{ij} が小さいほど、ある避難場所が避難先の候補として考えられる可能性が高くなる関係を表わしている。このうち、魅力度 Ψ_j については、京都市によって指定されている広域避難場所についてのみ、第5章で推定した値が利用可能である(表 5-4 参照)。一方の閾値 Θ_{ij} は、同じく第5章で導いた次の関係から予測できる。

$$\Theta_{ij} = -5.85lt_i + 2.325s_{ij} + 0.717d_{ij} - 0.132 \quad (2-22)$$

ただし、 t は住民の在住期間 (10^3 年)、 s は住民の初期位置と避難場所との直線距離 (km)、 d は住民と避難場所の間に避難を妨げる地理的な隙間が存在する場合を 1、それ以外の場合を 0 とするダミー変数である。式 (2-22) は、在住期間が長いほど、避難場所までの距離が短いほど、避難を妨げる地理的な隙間が存在しないほど、閾値 Θ_{ij} が小さくなる(確率 p_R が大きくなる) 関係を表わしている。なお、式 (2-21) を用いた計算では、住民が避難場所を一つも避難先として考えない(心理危険度ポテンシャルが分布しない) 場合も存在する。

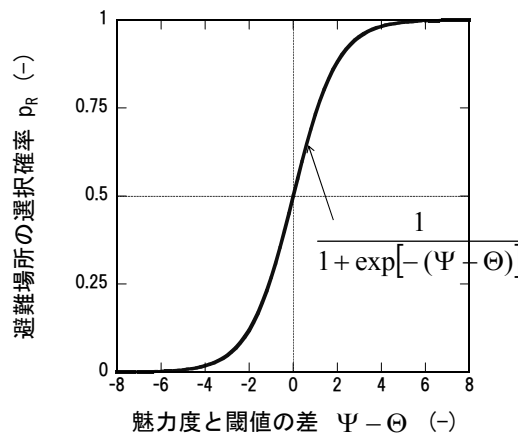


図 2-6 住民が避難場所を避難先の候補として考える確率

2.4 避難者の行動モデル

本モデルでは、個々の避難者の行動を時間ごとに記述することで、避難者全体の予測へとつなげる手法をとる。ここでは、これまでに定式化した火災危険度ポテンシャル Φ_F と心理危険度ポテンシャル Φ_p を式 (2-1) のように合成することで、避難者の移動指標となる避難ポテンシャル Φ_o を生成する。避難者は道路ネットワーク上を避難ポテンシャルの降下方向へと移動し、最終的な避難先に到達することで避難を完了する。ただし、移動中に曝露される高温気体の温度累積量が避難先へ逃げ込む前に許容量を超えた場合には、避難不能になるものとする。

2.4.1 火災に起因した避難の開始

市街地で火災が発生した場合，一部の住民は熱気流や輻射熱に曝されているにもかかわらず，家財を運び出したり消火活動を行うといった財産の固執によって，生命の危険が迫る寸前までは避難を開始しないことがある．こうしたことは1976年に発生した酒田市大火後のアンケート調査[8]からも明らかにされている．一方で，地震火災時には，建物の倒壊などによって住む家を奪われた住民が，火災が迫る以前に避難を開始することも考えられる．しかし，このような火災とは異なる現象を要因とした避難の開始は，現時点ではモデル化が困難である．

本モデルでは，住民の避難開始要因を火災からの影響に限定し，(1) 人体表面への熱伝達と，(2) 高温ガスの体内吸収を，その影響として考える．このとき，避難の開始は次のような確率論的モデルで表わされるものと仮定する（図 2-7）．

$$p_E = \max\left(\frac{\dot{q}_N''}{\dot{q}_{cr}''}, \frac{\Delta T}{T_{cr} - T_\infty}\right) \quad (2-23)$$

ただし， p_E は住民の避難開始確率， \dot{q}_N'' は住民へ伝達される正味の熱流束， \dot{q}_{cr}'' は住民が確実に避難を開始する熱流束， T_{cr} は住民が確実に避難を開始する曝露温度である．式 (2-23) は，火災からの影響が増加するにつれて避難を開始する可能性も増加し，最終的に許容可能な限界値を超えた場合には，確実に避難を開始する関係を表わしている．この中で，住民へ伝達される正味の熱流束 \dot{q}_N'' は次のように表わされる（図 2-8）．

$$\dot{q}_N'' = \dot{q}'' + \dot{q}_\infty'' + \dot{q}_H'' - \dot{q}_B'' \quad (2-24)$$

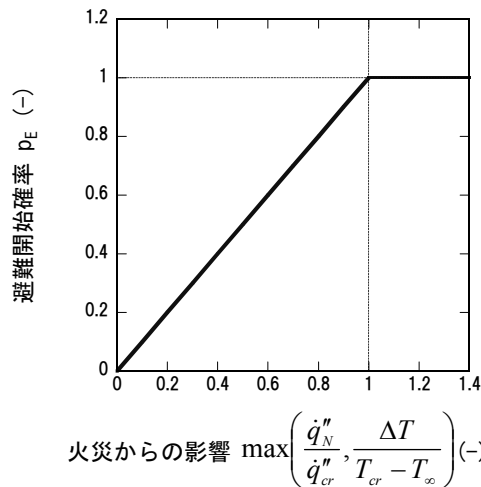


図 2-7 避難の開始確率

ただし,

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_{\infty}'' &= \sigma(T_{\infty} + \Delta T)^4 \\ \dot{q}_H'' &= h(T_{\infty} + \Delta T - T_B) \\ \dot{q}_B'' &= \sigma T_B^4 \end{aligned} \right\} \quad (2-25)$$

ここに, \dot{q}_{∞}'' は周辺気体から人体表面へ入射する輻射熱流束, \dot{q}_H'' は周辺気体と人体表面の間で対流により伝達される熱流束, \dot{q}_B'' は人体表面から放射される輻射熱流束, T_B は人体表面の温度, σ はステファンボルツマン定数である.

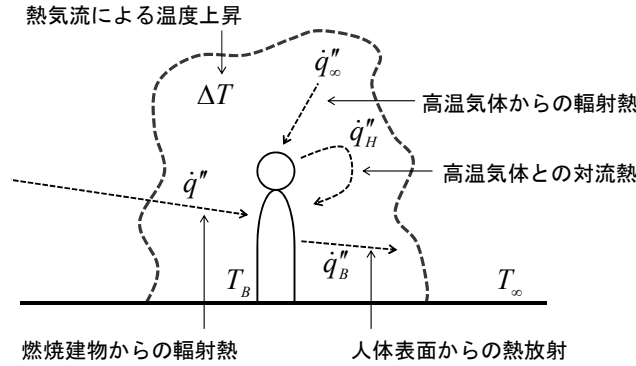


図 2-8 人体の熱収支

2.4.2 避難者の移動速度

地震火災時の都市避難では, 避難経路となる市街地の道路が避難者で混雑することが予想される. そこでの流れの性状は, 周囲の避難者との間で働く相互作用の影響を大きく受けるが, このような微視的な移動予測を都市規模の現象に適用すれば, 莫大な計算負荷が掛かる. そこで本モデルでは, 個々の道路上の避難者の流れを群集流とみなし, 既往の歩行実験から得られた密度速度式を利用することで, 個々の避難者の移動速度を計算する.

一般的に, 歩行者の人口密度が小さい場合には, 周囲の歩行者からの影響を受けずに歩行が可能であるが, 密度が増加するにつれて周囲の歩行者による制約を受けるため, 歩行速度は低下する[9]. 本モデルでは, こういった自由歩行と群集歩行の異なる歩行状態を考え, 道路 ij 上の避難者の移動速度 v_{ij} を打田[10]による密度速度式に倣い, 次のように表わす(図 2-9).

$$v_{ij} = \begin{cases} 1.3 & (\rho_{ij} < 0.64) \\ 1.48 - 0.28\rho_{ij} & (0.64 \leq \rho_{ij} < 4.92) \\ 0.1 & (4.92 \leq \rho_{ij}) \end{cases} \quad (2-26)$$

ただし、 ρ_{ij} は道路の単位面積あたりの避難者数である．ここでは、人口密度が小さい場合の移動速度に、平常時の標準的な歩行者の歩行速度（1.3 m/s）を採用する[9]．一方、人口密度の大きい群集流については、避難上の障害物の存在を無視すれば完全に移動が停止することは考えにくいいため、最も遅い移動速度を 0.1m/s と仮定する．

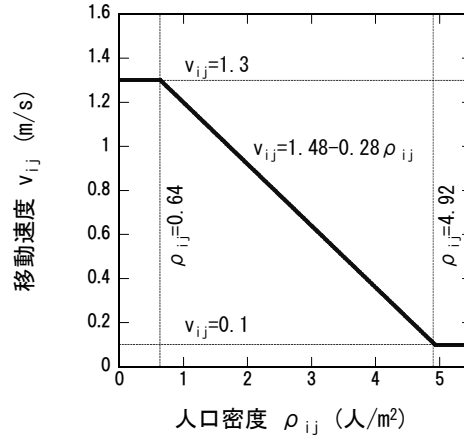


図 2-9 避難者の移動速度

2.4.3 避難経路の確率的な選択

交差点に到達した避難者は、そこに接続される道路群の中から経路を選択し、それを繰り返しながら移動する．避難者は道路ネットワーク上に形成された避難ポテンシャルの降下方向へ移動するが、その勾配が急な方向ほど経路として選択される可能性が高いものとする．ここで、避難者が位置する交差点を i 、それに隣接する交差点を j とすると、道路 ij を選択することによる単位時間あたりのポテンシャル降下量 g_{ij} （以降では、ポテンシャル勾配と呼ぶ）は、次のように表わされる．

$$g_{ij} = \frac{v_{ij}}{s_{ij}} (\Phi_{o,i} - \Phi_{o,j}) \quad (2-27)$$

ただし、 s_{ij} は道路 ij の長さである．

本モデルでは、道路 ij が経路として選択される確率 p_{ij} が、式 (2-27) で表わされるポテンシャル勾配 g_{ij} に比例するものと仮定し、避難者の移動がポテンシャルの降下方向に制限されることに注意して、次のように表わす．

$$p_{ij} = \frac{g_{ij}}{\sum_k^m g_{ik}} \quad (g_{ik} > 0) \quad (2-28)$$

ただし、 k はポテンシャル勾配 g が正となる隣接交差点の識別記号、 m はその数である．

なお、避難者が避難先を一つも認識できない（心理危険度ポテンシャルが分布しない）場合には、火災からある程度離れた所でポテンシャルの降下する経路が存在しない可能性がある。このような条件においては、道路上の避難者数 n_{ij} に応じて確率的に経路を選択するものと仮定し、道路 ij の選択確率 p_{ij} を次のように表わす。

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_l n_{il}} \quad (m=0) \quad (2-29)$$

ただし、 l は i に隣接する交差点の識別記号である。

2.4.4 累積曝露量に基づく避難の不能

市街地を移動する避難者は、燃焼領域から発生する熱気流や輻射熱に曝され、それによる生理的な影響が身体に蓄積される。このうち輻射熱は、主にその物理的作用によって皮膚熱傷といった体表の損傷をもたらすが、火災時において避難者が死亡する直接的な原因ではないと考えられている。一方の熱気流は、避難者がそれを体内に吸収することで気道や肺が損傷することになるが、避難不能の多くはこういった高温・有毒気体の吸収を原因としている[11]。そこで本モデルでは、地震火災時の避難不能要因を高温気体の吸収による気道熱傷に限定してモデル化を行う。

一般的に、動物が高温気体に曝された場合、曝露される気体の温度と致死や行動不能といった生理的反応が生じる限界時間との間には、ハーベルの法則が成り立つことが知られている[12]。本モデルではこれに倣い、避難者が曝される気体温度の累積量 Γ （以降では、累積曝露量と呼ぶ）を考え、その曝露時間 t との関係を表のように表わす。

$$\Gamma = \int_t (T_\infty + \Delta T - T_{cr})^n dt \quad (2-30)$$

ただし、 T_{cr} は生理的影響の発生する限界曝露温度、 n は定数である。このとき、高温気体の累積曝露による避難不能の条件は、次のように表わされる。

$$\Gamma > \Gamma_F \quad (2-31)$$

ただし、 Γ_F は致死量である。ここでは、生理的影響の発生する限界曝露温度 T_{cr} を東京消防庁[13]による高温気体の曝露下における消防職員の耐容限界に関する実験結果（表 2-1）から、

$$T_{cr} = 313(\text{K}) \quad (2-32)$$

と仮定し、定数 n と致死量 Γ_F を気道熱傷による死亡者データ[14]から推定した（図 2-10）。

$$n = 0.725, \quad \Gamma_F = 10808.0 \quad (R^2 = 0.971) \quad (2-33)$$

ここに、 R^2 は決定係数である。

		曝露温度 (°C)			
		50	55	60	65
湿度 (%)	70	24分20秒	13分30秒	3分00秒	26秒
	80	17分43秒	6分06秒	31秒	9秒
	90	9分36秒	2分30秒	23秒	不実施

表 2-1 高温気体の曝露下における防火衣非装着時の消防職員の耐容限界[13]

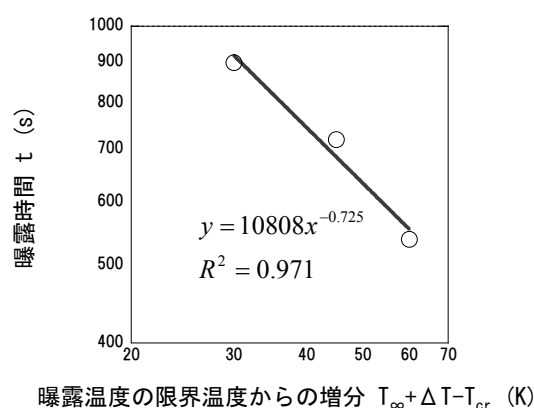


図 2-10 気道熱傷による死亡者の曝露温度と曝露時間[14]

2.5 まとめ

本章では、本研究の基幹である避難性状予測モデルについて、それを構成する次のサブモデルの定式化を行った。

- (A) 火災危険度ポテンシャル評価モデル
- (B) 心理危険度ポテンシャル評価モデル
- (C) 避難者の行動モデル

まず、(A)の火災危険度ポテンシャル評価モデルでは、避難者が曝される熱環境の厳しさを決定する要因として燃焼建物からの輻射と熱気流を考え、それらによる影響を火災危険度ポテンシャルとして定式化した。燃焼建物からの輻射については、燃焼建物内の高温ガスと開口部から噴出する火炎を輻射源と考え、それらを一点に代表させることで避難者に入射する輻射熱流束を求めることとした。熱気流については、既往の相似則を利用して気流軸上の温度上昇を予測した後、気流軸と避難者との距離を考えることで温度上昇の減

衰を算出することとした。複数の熱気流が合流する効果は、既往の関係式を利用することで、単一の熱源によってもたらされる温度上昇を重ね合わせることとした。

次に、(B)の心理危険度ポテンシャル評価モデルでは、広域避難場所といった市街地の安全な空間に向かって避難者が移動する様子を、ポテンシャルによって表現する手法を考えた。ここでは、理想流体の二次元流れからの類推で、流体力学的な考え方を道路ネットワーク上の人間の移動現象に置き換え、心理危険度ポテンシャルの計算式を導出した。この計算には、避難者が考える避難先を境界条件として与える必要があるが、避難場所の魅力度の偏りを考慮して避難先を予測する手法を、第5章で得られた成果を基に組み込んだ。

最後に、(C)の避難者の行動モデルについては、個々の避難者の行動を時間ごとに記述することで避難者全体の予測へとつなげる手法を採用した。住民の避難開始要因は火災からの影響に限定することとし、燃焼建物からの輻射と熱気流をもとに避難開始確率として定式化した。避難者は、火災危険度ポテンシャルと心理危険度ポテンシャルを合成した総合的なポテンシャルの高い地点から低い地点へと移動し、避難場所に到達することで避難が完了するものと考えた。この時の移動速度については、群集流を仮定した既往の密度速度式を利用することで、計算の簡略化を図った。避難者は高温気体の吸収による気道熱傷によって避難不能になるものと考え、避難者が曝露される気体温度の累積量をその指標とした。累積量の計算には、気体曝露に関する既往の関係式を利用し、それに含まれる未知定数を既往の火災死亡データから推定することで整理した。

参考文献

- [1] Fire Protection Handbook (16th Edition), NFPA, 1986
- [2] Beyler, C.L.: Fire Plume and Ceiling Jet, Fire Safety Journal, Vol.11, pp.53-76, 1986
- [3] Quintiere, J.G. & Grove, B.S.: A Unified Analysis for Fire Plumes, 27th Symp., (Int.) Comb., PP.2757-2766, 1998
- [4] 横井鎮男: 線熱源の風下における温度分布(熱源の高さが床上 3cm の場合), 災害の研究 7, pp.151-159, 1970.9
- [5] 土橋常登・田坂茂樹・吉田正友・田中哮義: 複数火源の火災気流に曝される受熱点の温度上昇の推定, 日本建築学会大会学術概便集, pp.13-14, 2000.9
- [6] 伊理正夫・腰塚武志: 計算幾何学と地理情報処理 第2版, 共立出版, 1997
- [7] 中央防災会議: 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 1923 関東大震災, 2006.7
- [8] 塚越功: 酒田市大火の避難行動の解析, 昭和 50 年度秋季講演会梗概集, 建設省建築研究所, pp.79-103, 1977
- [9] 戸川喜久二: 群集流の観測に基づく避難施設の研究, 建築研究報告, No.14, 建設省建築研究所, 1955
- [10] 岡田光正・吉田勝行・柏原士郎・辻正矩: 建築と都市の人間工学 空間と行動のしくみ, 鹿島出版会, pp.30-32, 1977
- [11] 日本建築学会: 防火材料パンフレット, 丸善, pp.77-79, 1993
- [12] 田中哮義: 改訂版 建築火災安全工学入門, 日本建築センター, pp.315-317, 2002
- [13] 東京消防庁: 消防科学研究所報 31 号, pp.131-136, 1994
- [14] 中田金市: 火災, 共立出版, p.626, 1969

第 3 章

計算負荷の軽減を重視した 市街地火災の物理的延焼モデル

3.1 はじめに

第 2 章で定式化を行った避難性状予測モデルでは、避難性状を支配する要因の一つに燃烧建物からの輻射熱流束と熱気流による温度上昇を考慮している。この計算を行うには、燃烧領域の時間変化を避難モデルに入力条件として与える必要がある。このため、将来起こり得る地震火災を想定して避難性状を予測するには、火災そのものの拡大性状の予測手法も整備しておく必要がある。

市街地火災の拡大を時系列に予測するモデルはこれまでに数多く提案されており、それらは大きく二つに分類できる：

- 火災の拡大を過去の大火データに基づいて定式化した「経験的モデル」[1-8]
- 火災の拡大を現象の物理的知見に基づいて定式化した「物理的モデル」[9,10]

浜田による延焼速度式[1]に代表される経験的モデルの利点は、比較的簡便な関係式で燃烧領域の時間変化を予測可能な点にある。しかし、市街地火災の発生頻度が低いいため、経験的モデルの精度を左右する検証用データを確保することが難しく、モデルの信頼性を保証することが課題となっていた。こうした経験的モデルの課題は、火災拡大のメカニズムを陽に考慮した物理的モデルの開発によって克服され、多様な市街地特性や火災安全対策を反映させた計算が可能になってきた。ただし、モデルの合理化に伴って計算に必要な時間や情報量が増大し、最大でも平常時大火といった数千棟規模の火災にしか適用できないという課題も存在する。

本研究で扱う地震火災では、複数の火災が都市の広い範囲で同時に発生する可能性があるため、計算上取り扱う必要のある建物数は、平常時大火の数千棟から数十万棟の規模に膨れ上がることになる。このため、既往の物理的モデルを地震火災のような都市スケール

の現象に適用することは難しく、たとえ適用できたとしても、計算には莫大な時間が掛かることになる。

そこで本章では、既往の物理的延焼モデル[10]に情報量の軽減と計算速度の高速化のための新たなアルゴリズムを導入することで、都市規模の避難シミュレーションに利用可能な延焼サブモデルの定式化を行う。さらに、酒田市大火の延焼シミュレーションを行い、当時の調査報告および既往の物理的延焼モデルとの比較を行うことで、定式化した延焼モデルの予測性能について検証する。

3.1.1 延焼モデルの概要

図 3-1 は、本章で定式化する延焼モデルの概念を示したものである。ここでは、既往の物理的延焼モデルに倣って、市街地火災を複数の建物火災の集合とみなし、他の建物火災の熱的影響下における個々の建物の火災性状を予測することで、都市全体の延焼性状へとつなげる。このとき、市街地火災の拡大現象は次の二つの現象に分解される：

- (A) 建物内部の火災現象
- (B) 建物間の火災拡大現象

(1) 建物内部の火災現象

建物内部の火災性状を予測するにあたっては、一層ゾーンモデル[例えば 11]の概念に基づいた定式化を行う。一層ゾーンモデルでは、建物を構成する各室を気体の状態が一様な検査体積とみなし、検査体積ごとに定式化される質量やエネルギー等の収支式を連立して解くことで、気体温度等の物理量を時系列に予測する。一般的にこの時系列解法には、次のオイラー法を代表とする陽解法が用いられることが多い。

$$X^{(N+1)} = X^{(N)} + \frac{\partial X}{\partial t} \Delta t \quad (3-1)$$

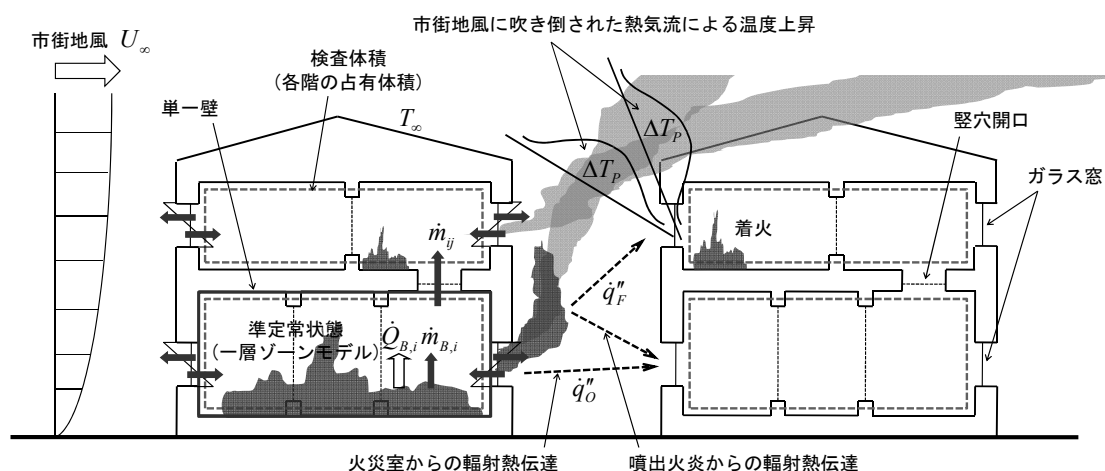


図 3-1 計算負荷の軽減を重視した延焼モデルの概念

ただし、 X は時系列予測の対象となる物理量（例えば温度）、 t は時間、 Δt は計算の時間刻み、上付きの添え字は計算ステップ数である。このような陽解法を利用した火災性状解析では、0.1sec 程度の小さな時間刻みが要求されるため、市街地火災のように十数時間以上も継続する現象を解析する場合には、必然的に計算に費やす時間が長くなる。そこで本モデルでは、本来は非定常的に変化する検査体積ごとの火災性状を準定常状態に近似することで、時間刻み Δt が陽には含まれない時系列予測式を導き、計算上の刻み幅の大幅な拡張を図る。

また、一層ゾーンモデルを各室に適用するにあたっては、建物内部の間仕切りや壁に関する情報が必要となる。こういった建物形態に関する情報は対象市街地の大規模化に伴って把握が困難になるとともに、計算資源の大部分がこれらのデータの格納に費やされることになる。そこで本モデルでは、次のような計算上の簡略化を行うことで、計算に必要な情報量の軽減を図る：

- 複数の室で分割される建物内部の空間構成を無視し、火災性状の計算単位となる検査体積を各階の占有体積に設定する
- 開口部は外壁面および上下階をつなぐ位置に一部ずつ設定し、ガラスといった開口部材は外壁面の開口部にのみ存在する
- 検査体積を構成する複数の壁を一枚の壁で代表させる（開口部材についても同様）

(2) 建物間の火災拡大現象

ここでは、建物間の火災拡大現象を支配する要因として、次の二つの要因を考える：

- 燃焼建物からの輻射
- 燃焼建物の風下側に形成される熱気流

なお、その他の火災拡大要因として、市街地風によって飛散する火の粉（飛び火）の存在が挙げられるが、これに関する研究は十分になされていない。そこで本章では、上記の二つの要因に限定して火災拡大のモデル化を行い、飛び火による延焼については、改めて第4章でモデル化を行うこととする。

輻射および熱気流による延焼は、基本的に既往の物理的延焼モデルの考え方を踏襲することで、いずれも模型実験等により既に精度が検証されたモデルを利用することができる。建物間の延焼を予測するにあたっては、これらの要因の作用の結果、次のいずれかが満たされた場合に、未燃建物への延焼が起こるものと考えてる：

- 開口を經由して室内に入射する熱流束が限界値を超えた場合
- 可燃性外装材の温度がその熱分解温度を上回った場合

3.2 建物内部の準定常火災モデル

図 3-2 は、建物内部の火災性状予測モデルの概念を示したものである。一層ゾーンモデルの概念に基づいて、検査体積内では質量、エネルギー、化学種濃度（酸素 O と可燃性気体 F ）について、次の定常的な保存関係が成り立つものと仮定する。

$$\left[\begin{array}{l} \dot{Q}_{W,i} = \{\sigma(T_i^4 - T_{W,i}^4) + h_i(T_i - T_{W,i})\}A_{W,i} \\ \dot{Q}_{D,i} = 0.5\sigma(T_i^4 - T_\infty^4)A_{D,i} \\ \dot{Q}_{O,ij} = \sigma(T_i^4 - T_j^4)A_{O,ij} \end{array} \right] \quad (3-7)$$

ここに、 σ はステファンボルツマン定数、 h は壁の対流熱伝達率、 T_w は壁の室内側の表面温度、 T_∞ は外気温度、 A_w は壁の表面積、 A_D は開口部材の面積、 A_o は開口部の面積であり、気体および壁を黒体とみなした。なお、壁の室内側の表面温度 T_w については、壁を無限平板とみなし、次の一次元熱伝導方程式を有限差分法により解くことで予測する。

$$\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) - \dot{m}_v''' L_v \quad (3-8)$$

ここに、 k_w, ρ_w, c_w はそれぞれ壁の熱伝導率、密度、比熱、 \dot{m}_v''' は単位体積あたりの水分の蒸発速度、 L_v は水分の蒸発潜熱である。

3.2.1 新しい時系列解法

ここでは、式(3-2, 3-3, 3-4)で表わされる定常保存式にいくつかの近似を導入しながら連立することで、気体温度 T および化学種の質量分率 Y_x を時系列に予測可能な関係式を導く。気体温度 T の予測にあたっては、式(3-3)で表わされる気体のエネルギー収支式に着目し、式(3-7)を用いて詳細に記せば次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{B,i} + \dot{Q}_{EX,i} + c_p \dot{m}_{B,i} T_P - \{\sigma(T_i^4 - T_{W,i}^4) + h_i(T_i - T_{W,i})\}A_{W,i} \\ - 0.5\sigma(T_i^4 - T_\infty^4)A_{D,i} - \sum_j \sigma(T_i^4 - T_j^4)A_{O,ij} - \sum_j (c_p \dot{m}_{ij} T_i - c_p \dot{m}_{ji} T_j) = 0 \end{aligned} \quad (3-9)$$

上式(3-9)は気体温度 T に関する四次の非線形方程式に相当するが、これを解くにはニュートン法といった数値計算手法が必要となる。こうした数値計算では、解の収束のために反復計算が行われるため、その分計算に掛かる時間は増加する。ここでは、計算時間の短縮を目的として次のような近似を導入し、上式(3-9)の線形化を図る。

$$T_{(N+1)}^4 - X^4 \approx (T_{(N)}^2 + X^2)(T_{(N)} + X)(T_{(N+1)} - X) \quad (3-10)$$

ただし、下付きの添え字は計算ステップ数である。このとき、式(3-9)は気体温度 $T_{(N+1)}$ の一次関数として次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{B,i} + \dot{Q}_{EX,i} + c_p \dot{m}_{B,i} T_P - \phi_{W,i} A_{W,i} (T_{(N+1)} - T_{W,i}) \\ - \phi_{D,i} A_{D,i} (T_{(N+1)} - T_\infty) - \sum_j \phi_{O,ij} A_{O,ij} (T_{(N+1)} - T_j) - \sum_j (c_p \dot{m}_{ij} T_{(N+1)} - c_p \dot{m}_{ji} T_j) = 0 \end{aligned} \quad (3-11)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} \phi_{W,i} &= \sigma(T_{(N)}^2 + T_{W,i}^2)(T_{(N)} + T_{W,i}) + h_i \\ \phi_{D,i} &= 0.5\sigma(T_{(N)}^2 + T_{\infty}^2)(T_{(N)} + T_{\infty}) \\ \phi_{O,ij} &= \sigma(T_{(N)}^2 + T_j^2)(T_{(N)} + T_j) \end{aligned} \right] \quad (3-12)$$

ここに, T_w, T_{∞}, T_j はいずれも時間ステップ N における温度である. すなわち, ϕ は前時間ステップの温度から計算される輻射熱伝達率, または総合熱伝達率に相当する. このとき, 式 (3-2) を用いて式 (3-11) を整理すれば, 次のような時系列予測式が求まる.

$$T_{(N+1)} = \frac{\dot{Q}_{B,i} + \dot{Q}_{EX,i} + c_p \dot{m}_{B,i} T_P + \phi_{W,i} A_{W,i} T_{W,i} + \phi_{D,i} A_{D,i} T_{\infty} + \sum_j \phi_{O,ij} A_{O,ij} T_j + \sum_j c_p \dot{m}_{ji} T_j}{\phi_{W,i} A_{W,i} + \phi_{D,i} A_{D,i} + \sum_j \phi_{O,ij} A_{O,ij} + c_p \left(\dot{m}_{B,i} + \sum_j \dot{m}_{ji} \right)} \quad (3-13)$$

化学種の質量分率 Y_x の予測にあたっては, 式 (3-4) で表わされる化学種の質量収支式に着目し, 式 (3-2) を用いて整理すれば次の式が求まる.

$$Y_{x,i}^{(N+1)} = \frac{\dot{\Gamma}_{x,i} + \sum_j \dot{m}_{ji} Y_{x,j}^{(N)}}{\dot{m}_{B,i} + \sum_j \dot{m}_{ji}} \quad (3-14)$$

ただし, 酸素 O および可燃性気体 F の生成速度 $\dot{\Gamma}_O, \dot{\Gamma}_F$ は,

$$\dot{\Gamma}_{O,i} = -\frac{\dot{Q}_{B,i}}{\Delta H_O} \quad \dot{\Gamma}_{F,i} = \dot{m}_{B,i} - \frac{\dot{Q}_{B,i}}{\Delta H_F} \quad (3-15)$$

ここに, $\Delta H_O, \Delta H_F$ は酸素および可燃性気体が単位量消費された場合の発熱量である.

3.2.2 可燃物の質量減少速度

区画火災時の可燃物の質量減少速度 \dot{m}_b については, 既往の区画燃焼実験の結果に基づいた計算式が整理されている[12]. ここでは, 既往の計算式を拡張した次の式[10]を用いることで, 複数の開口を有する区画での燃焼領域の拡大に伴った質量減少速度 \dot{m}_b を予測する(図 3-3).

$$\frac{\dot{m}_B}{A_F} = \begin{cases} 0.86\dot{m}_o'' & (\dot{m}_o'' \leq 0.0082) \\ 0.007 & (0.0082 < \dot{m}_o'' \leq 0.0117) \\ 0.003 + 1.03\dot{m}_o'' \cdot \exp(-94.4\dot{m}_o'') & (0.0117 < \dot{m}_o'') \end{cases} \quad (3-16)$$

ただし,

$$\dot{m}_o'' = \frac{\sum_j \dot{m}_{ji} Y_{O,j}}{A_F} \quad (3-17)$$

ここに, \dot{m}_o'' は可燃物の単位表面積あたりの酸素流入速度, A_F は可燃物の燃焼面積である.

式 (3-16, 3-17) を用いて質量減少速度 \dot{m}_b を計算するには, 可燃物の燃焼面積 A_F を予測する必要がある. 建物が燃焼する際の可燃物は, 家具や衣類といった部屋の使用に伴って持ち込まれる収納可燃物 (= L) と, 建物の構造材といった固定可燃物 (= M) に分類される. このうち, 収納可燃物の燃焼面積は, 可燃物の上方に形成される火炎や室内の高温気体からの加熱によって次第に拡大していく. このときの発熱速度は, 時間の二乗に比例して増加することが経験的に知られており, これを収納可燃物の燃焼面積 $A_{F,L}$ が時間の二乗に比例して増加すると読み換えると (図 3-4),

$$A_{F,L} = \min[\alpha_F (t - t_{ig})^2, 0.7 w_L^{1/3} A_{floor}] \quad (3-18)$$

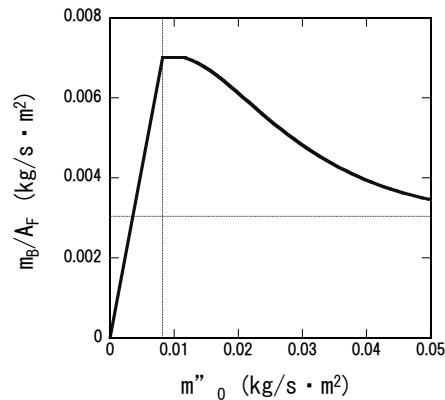


図 3-3 酸素流入速度と質量減少速度

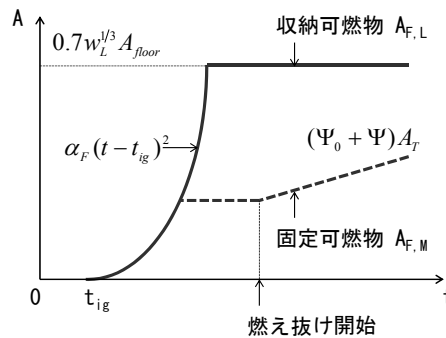


図 3-4 可燃物の燃焼面積

ここに、 α_F は燃焼面積の成長係数、 t_{ig} は着火時間、 w_L は収納可燃物密度、 A_{floor} は室の床面積である。ただし、式 (3-18) の右辺第二項は、火災が部屋全体に拡大した時に加熱を受ける収納可燃物の面積である[13]。一方、固定可燃物の燃焼面積 $A_{F,M}$ については、参考となる調査結果が少なく合理的なモデル化が難しい。そこで、収納可燃物と同様に時間の二乗に比例して増加するものと仮定した (図 3-4)。

$$A_{F,M} = \min[\alpha_F(t - t_{ig})^2, (\Psi_0 + \Psi)A_T] \quad (3-19)$$

ここに、 A_T は室の表面積、 Ψ_0 は固定可燃物の元々の露出部分の比率、 Ψ は壁が燃え抜けることで増加する露出部分の比率である。ただし、式 (3-19) の右辺第二項は、火災が部屋全体に拡大した時に加熱を受ける固定可燃物の面積であり、内装材など出火前からの露出分 Ψ_0 に壁が燃え抜けることによる露出分 Ψ を加えたものとした[10]。

3.2.3 可燃物の燃焼に伴う発熱速度

一般的に、可燃物の熱分解によって放出される可燃性気体に対して酸素の供給が少ない場合には、発熱速度は酸素の供給速度 \dot{m}_O によって決定される。逆に、可燃性気体の放出速度に対して酸素が過剰に供給される場合には、発熱速度は可燃性気体の放出速度 \dot{m}_B に支配される。ここでは、このような換気支配型燃焼と燃料支配型燃焼の異なる燃焼タイプを考慮し、可燃物の燃焼に伴う発熱速度 \dot{Q}_B を次のように表わす。

$$\dot{Q}_B = \min(\Delta H_O \dot{m}_O, \Delta H_F \dot{m}_B) \quad (3-20)$$

ここに、 $\dot{m}_O = \dot{m}_O'' A_F$ である。

3.2.4 開口部を経由した質量の移動

火災時には、隣接する空間との間に温度差や外気風による圧力差が生じることで、開口部を経由した換気が発生する。図 3-5 は、圧力差による開口部の流れの考え方を模式的に示したものである。隣接する空間 i, j の間には圧力が等しくなる高さ (中性帯高さ Z_N) が存在し、気体の流出入は中性帯を境に逆向きになる。このときの開口流量 $\dot{m}_{ij}, \dot{m}_{ji}$ は、中性帯が開口部の上下端に挟まれる場合、それぞれ次式より計算できる[14]。

$$\dot{m}_{ij} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_i \Delta\rho} (H_u - Z_N)^{3/2} \quad \dot{m}_{ji} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_j \Delta\rho} (Z_N - H_l)^{3/2} \quad (3-21)$$

ここに、 α は開口流量係数、 B は開口幅、 g は重力加速度、 H_u は開口上端高さ、 H_l は開口下端高さ、 $\Delta\rho (= |\rho_i - \rho_j|)$ は隣接する空間の気体密度差の絶対値である。なお、中性帯高さ Z_N と開口端高さ H_u, H_l の関係は、式 (3-21) 以外にも数種類存在するため、全ての場合での開口流量について予め整理しておく必要がある[14]。

中性帯高さ Z_N を求めるためには各空間の圧力分布を把握する必要があるが、外気空間と室内空間をつなぐ開口部での流れを考える場合には、市街地風による風圧を考慮する必要がある。ここでは、各空間の圧力分布 p の計算に、大気圧 p_∞ に対する地表面相対圧力 p_0 を基準として、高さ z 方向への静水圧分布を仮定した次の式を用いる。

$$p = p_0 - \rho g z + C_\infty \cdot \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \quad (3-22)$$

ただし、 C_∞ は風圧係数、 U_∞ は市街地風の風速である。風圧係数 C_∞ は建物壁面に対する気流の入射角に依存することが知られており、この計算には既往の風洞実験結果[15]を用いる。このとき、中性帯高さ Z_N は、

$$Z_N = \frac{p_{0,i} - p_{0,j} + C_\infty \cdot \frac{1}{2} \rho_i U_\infty^2}{(\rho_i - \rho_j)g} \quad (3-23)$$

なお、基準圧力 p_0 を求めるには、式 (3-2) の質量収支式を基準圧力 p_0 の関数と見立て、条件式 F として使用する。

$$F_i = \dot{m}_{B,i} - \sum_j [\dot{m}_{ij}(p_1, p_2, \dots, p_N) - \dot{m}_{ji}(p_1, p_2, \dots, p_N)] = 0 \quad (3-24)$$

ただし、圧力 p の下付きの添え字は建物内にある検査体積の識別番号を表わす。条件式 F は建物内にある検査体積の数 N だけ存在することから、式 (3-24) を次のように連立し、ニュートン法を用いて解くことで各検査体積の基準圧力 p_0 を予測する。

$$\left. \begin{aligned} F_1(p_1, p_2, \dots, p_N) &= 0 \\ F_2(p_1, p_2, \dots, p_N) &= 0 \\ &\vdots \\ F_N(p_1, p_2, \dots, p_N) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3-25)$$

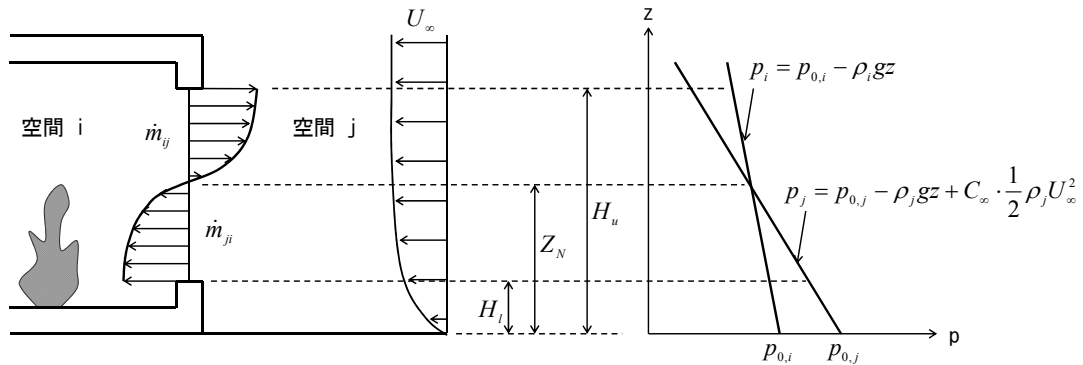


図 3-5 圧力差による開口部の流れ

3.2.5 開口部材への熱伝達とその脱落

ガラス窓といった開口部材の内部では、火災からの加熱を受けて熱伝導による温度変化が生じる。一般的に、開口部材の厚みは壁に比べて十分に薄いことが多い。そこで本モデルでは、開口部材内部の温度分布を無視し温度を一点で代表させる。このとき、開口部材とその周辺気体との間では輻射による熱伝達が支配的であり、開口部材に入射する熱流束とそこから放射される熱流束が等しいものとみなすと、次の関係が成り立つ（図 3-6）。

$$\sigma T^4 + \sigma T_\infty^4 = 2\sigma T_G^4 \quad (3-26)$$

ただし、 T_G は開口部材の温度である。このとき、開口部材への失熱速度 \dot{Q}_b は、式（3-26）を整理して次のように表わされる。

$$\dot{Q}_{b,i} = \sigma(T_i^4 - T_G^4)A_{D,i} = 0.5\sigma(T_i^4 - T_\infty^4)A_{D,i} \quad (3-27)$$

火災加熱を受けるガラス窓では亀裂による脱落が生じ、新たな開口が生まれることが多い。ここでは、開口部材の温度 T_G が温度 T_l を超えれば部材の軟化が始まり、温度 T_u に達した時には完全に脱落しているものとする。この間の脱落面積 ΔA_D は、開口部材の温度上昇分に比例するものと仮定し、次のように表わす。

$$\Delta A_D = \frac{T_G - T_l}{T_u - T_l} A_{D,0} \quad (3-28)$$

ただし、 $A_{D,0}$ は開口部材の元々の面積である。なお、開口部材の脱落に伴って開口部の面積 A_{Op} は増加することになる。

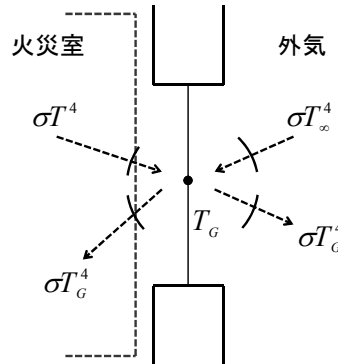


図 3-6 開口部材の熱収支

3.2.6 壁の燃え抜け

建物を構成する壁が火災による強い加熱を受けると劣化が始まり、最終的には脱落して燃え抜けが起こる。この燃え抜けは亀裂の発生や部材の溶融、燃焼などの様々な要因で起こりその発生機構は複雑であるが、ここでは簡単のため、部材へ入射する単位面積あたりの累積熱量が限界値 Q_{cr}'' を超えた段階で燃え抜けが始まるものと仮定する。このとき、壁の燃え抜けが始まる時間 t は、加熱が始まった時間を 0 として次のように表わされる[10].

$$\int_0^t \dot{q}_w'' dt > Q_{cr}'' \quad (3-29)$$

ここに、 \dot{q}_w'' は壁へ入射する熱流束である。ただし、燃え抜けの始まる限界値 Q_{cr}'' は、建築部材の耐火試験における性能担保時間の概念を利用し、次のように表す。

$$Q_{cr}'' = \int_0^{t_{cr}} \dot{q}_{\text{standard}}'' dt \quad (3-30)$$

ただし、 $\dot{q}_{\text{standard}}''$ は耐火試験時の部材への入射熱流束(ISO834 標準加熱を加えた際に部材へ入射する熱流束)、 t_{cr} は耐火試験において部材の燃え抜けが確認された時間である。なお、式(3-30) は次のように近似できる[16].

$$Q_{cr}'' \approx \int_0^{t_{cr}} \sigma \left(460 t_{\min}^{1/6} + 293 \right)^4 dt \quad (3-31)$$

ここに、 t_{\min} は加熱時間 (分) である。

燃え抜けによる壁の欠損範囲を求めるにあたっては、入射する熱流束 \dot{q}_w'' に応じて壁の密度 ρ_w が減少するものとみなし、燃え抜け前の開口部がその密度変化に比例して拡大していくものとする。火災加熱に伴う壁体密度 ρ_w の変化は次のように表わされる[10].

$$d_w \frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \frac{\dot{q}_w''}{L_w} \quad (3-32)$$

ただし、 d_w は壁の厚み、 L_w は燃え抜けの速度を表わす比例係数 (燃え抜け潜熱) である。このとき、燃え抜けによる開口部面積の増分 ΔA_o は次のように表わされる。

$$\Delta A_o = \frac{\rho_{w,0} - \rho_w}{\rho_{w,0}} A_w = \Psi \cdot A_w \quad (3-33)$$

ただし、 $\rho_{w,0}$ は燃え抜け前の壁の密度、 Ψ は壁の欠損率 (燃え抜けで増加した壁の露出部分の比率) である。

3.3 建物間の火災拡大モデル

ここでは、建物間の火災拡大現象を支配する要因として、(1) 燃焼建物からの輻射、および、(2) 燃焼建物の風下側に形成される熱気流、を考える。このうち後者については、第2章で定式化した複数の熱気流による温度上昇(2.2.2)と同様の考え方を利用できるため、ここでの記述は省略する。

3.3.1 火災室の高温気体からの輻射熱伝達

市街地火災時には、火災室の高温気体から発生する輻射熱が隣接する未燃建物の室内へ入射し、可燃物が加熱に曝されることで新たな出火が起こる。この入射熱量は、輻射源と隣接する建物との間の幾何学的な関係から求まる形態係数に依存するが、建物が密集する市街地ではこの関係は複雑であり、その計算には大きな負荷が掛かる。ここでは、火災室の開口部の重心を代表点にとり、代表点から放射される熱流束が方向によらず一様であるとみなすことで、計算の簡略化を図る(図3-7)。このとき、火災室の高温気体から隣接建物の内部へ入射する輻射熱流束 \dot{q}_o'' は、次のように表される。

$$\dot{q}_o'' = \frac{\sigma T^4 A_o}{4\pi d^2} \cos \gamma \quad (3-34)$$

ただし、 π は円周率、 d は代表点と隣接する開口部の重心との距離、 γ は隣接する開口部の外向き法線ベクトルと輻射熱線のなす角度である。

3.3.2 開口噴出火炎からの輻射熱伝達

ある室で発生した火災が十分に発達すると、窓や扉のような開口部が破損し、火炎が破損した開口部から建物の外部へと噴き出る。建物の外部へ噴出した火炎は高温のため浮力によって上昇し、隣接する未燃建物や火災階より上階へ延焼をもたらす。このような開口

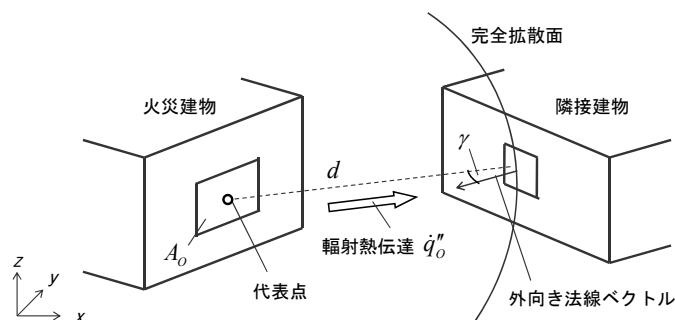


図3-7 火災室の高温気体からの輻射熱伝達

噴出火炎はある空間的な広がりをもって分布することになるが、ここでは簡単のため、開口噴出火炎を温度が一様な円筒形状の輻射面で近似する（図 3-8）. このとき、火炎からの輻射を受ける室の開口部を受熱面とみなすと、開口噴出火炎から室内へ入射する輻射熱流束 \dot{q}_F'' は次のように表される.

$$\dot{q}_F'' = \sigma T_F^4 \cdot F_V = \sigma (T_\infty + \Delta T_F)^4 \cdot F_V \quad (3-35)$$

ただし、 T_F は輻射面の代表温度、 F_V は受熱面上の微小面積要素に対する輻射面の形態係数、 ΔT_F は開口噴出熱気流の火炎領域における気流軸上温度上昇である.

外気風圧の影響などにより火災室内への強制的な給気が存在する場合、噴出熱気流の火炎域における気流軸上温度上昇 ΔT_F は次のように表される[17].

$$\frac{\Delta T_F}{T_\infty} = 2.0 Q^{*2/3} \quad (3-36)$$

ここに、 Q^* は無次元発熱速度であり、

$$Q^* = \frac{\dot{Q}_F}{c_p \rho_\infty T_\infty g^{1/2} B (H_u - Z_N)^{3/2}} \quad (3-37)$$

ただし、 \dot{Q}_F は開口噴出火炎が保有する単位時間あたりの熱量であり、次式で表わす.

$$\dot{Q}_F = c_p \dot{m}_{ij} (T_i - T_\infty) + \Delta H_F Y_{F,i} \dot{m}_{ij} \quad (3-38)$$

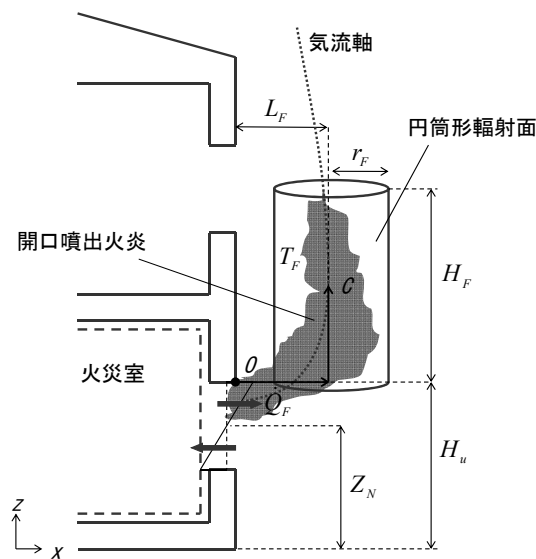


図 3-8 開口噴出火炎からの輻射熱伝達

開口噴出火炎の形態係数 F_v を算出するには、図 3-9 に示すような、円筒の重心 C と隣接する開口部の重心が高さ方向にずれる場合を考える。ここで、円筒 V を円筒 1 と円筒 2 に分ければ、受熱面上の微小面積要素から見た円筒の形態係数 F_v は次のように表わされる。

$$F_v = F_1 + F_2 \quad (3-39)$$

ここに、 F_1, F_2 はそれぞれ受熱面上の微小面積要素から見た円筒 1, 2 の形態係数である。円筒 1 の底面の中心点 D （もしくは円筒 2 の上面の中心点 D ）は、微小面の垂線上に位置することになるが、この場合の円筒 1, 2 の形態係数は、円筒の高さ a を半長軸、円筒の半径 b を半短軸とする正対した楕円面の形態係数で近似できる[18]。このとき、形態係数 F_1, F_2 は次式より計算できる。

$$F = \frac{ab}{2\sqrt{(h^2 + a^2)(h^2 + b^2)}} \quad (3-40)$$

ここに、 h は円筒の底面の中心点と微小面との距離である。

円筒形輻射面の重心 C の位置は、開口部上端の幅方向中心に基準点 O をとり、これに対する相対位置ベクトルとして次式で表されるものとする（図 3-8）。

$$\overrightarrow{OC} = L_F \mathbf{e}_x + 0.5H_F \mathbf{e}_z \quad (3-41)$$

ここに、 L_F は噴出火炎の気流軸と開口部上方にある壁面との離隔距離、 H_F は円筒形輻射

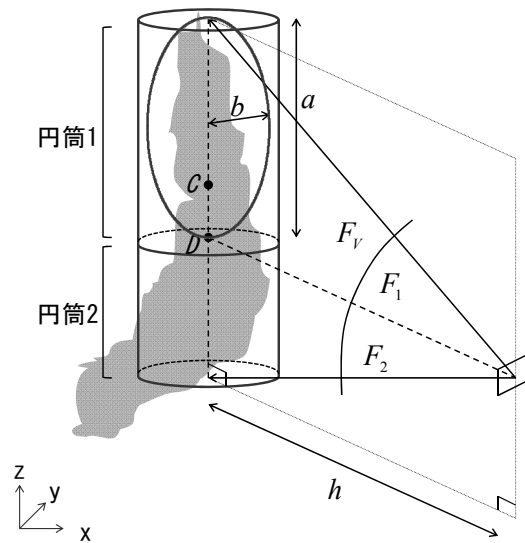


図 3-9 円筒の重心と開口部がずれる場合

面の高さ、 \mathbf{e}_x は壁面の外向き法線ベクトル、 \mathbf{e}_z は鉛直上向きの単位ベクトルである。このうち、離隔距離 L_F は既往の模型実験[19]の結果に基づき、次式より計算する。

$$\frac{L_F}{B} = 0.21 \left(\frac{u_0}{\sqrt{gB}} \right)^2 Q^{*-2/3} \quad (3-42)$$

ここに、 u_0 は開口面での最大噴出速度である。一方、円筒形輻射面の高さ H_F は、開口噴出火炎が保有する単位時間あたりの熱量 \dot{Q}_F のうち輻射によって消費される熱量が、円筒形輻射面から放射される熱量に等しいものとみなし、次式で表す。

$$H_F = \frac{0.3\dot{Q}_F}{2\pi r_F \cdot \sigma T_F^4} \quad (3-43)$$

ただし、0.3 は火炎の保有する熱量 \dot{Q}_F のうち輻射によって消費される熱量の割合、 r_F は円筒形輻射面の半径である。なお、円筒形輻射面の半径 r_F は、開口部における気体の噴出面の等価半径に等しいものとして、次式で表す。

$$r_F = \sqrt{\frac{B(H_u - Z_N)}{\pi}} \quad (3-44)$$

3.4 準定常火災モデルの予測精度の検証

これまでに定式化した延焼モデルを用いて市街地火災の予測計算を行うには、まず本モデルに導入した準定常近似アルゴリズムの妥当性を検証しておく必要がある。ここでは、二階建ての単純な建物を仮定して火災シミュレーションを行い、モデルによって計算される気体温度および化学種の質量分率を、式 (3-13, 3-14) に代えてオイラー法を用いた場合の計算結果と比較することで、導入したアルゴリズムの予測精度について検討を加える。

3.4.1 計算条件

図 3-10 は、計算を行うにあたって設定した建物を示したものである。建物は床面が 10m×10m の正方形、階高が 3m の二階建てとし、一階で出火が起こるものとした。開口部は各壁面に幅 4.0m、高さ 1.5m のものが一箇所ずつ存在するものとし、上下階をつなぐ堅穴の大きさは 3.0m² とした。なお、建物構造の燃焼特性は表 3-1 のように設定した[20]。

表 3-2 は、計算に関するその他の条件を示したものである。ここでは、市街地風による影響を考えないものとした。本モデルによる計算の時間刻み Δt は 0.2, 30.0, 60.0sec の三通り、オイラー法による時間刻み Δt は 0.2sec の一通りとした。なお、式 (3-13, 3-14) に代えてオ

イラー法を用いた場合の気体温度 T および化学種の質量分率 Y_x は、式 (3-2, 3-3, 3-4) を

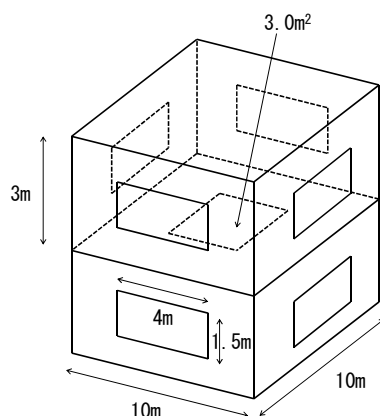


図 3-10 設定した建物条件

表 3-1 設定した熱物性値

収納可燃物密度		30 (kg/m ²)
固定可燃物密度		60 (kg/m ²)
固定可燃物の初期露出表面積比		0.2
壁	厚み	12 (mm)
	熱伝導率	0.15×10^{-3} (kW/mK)
	輻射吸収率	1
	対流熱伝達率	0.01 (kW/m ² K)
	比重	500 (kg/m ³)
	比熱	1.8 (kJ/kgK)
	燃え抜け時間	30 (min)
	燃え抜け潜熱	5000 (kJ/kg)

表 3-2 計算条件

時系列解法	本モデル	オイラー法
計算時間刻み Δt	0.2, 30.0, 60.0 (sec)	0.2 (sec)
計算時間	60 (min)	
気象条件	外気温 293 (K) ・ 無風	
燃焼面積の成長係数 α_F	1.0×10^{-3} (kW/mK)	
酸素の単位量消費あたりの発熱量 ΔH_0	13,100 (kJ/kg)	
可燃性気体の単位量消費あたりの発熱量 ΔH_F	17,300 (kJ/kg)	
自由空間での燃焼における可燃物の酸素流入速度 $m_{0,\infty}$	0.01374 (kg/m ² s)	
開口部材の軟化が始まる温度 T_l	373 (K)	
開口部材が脱落する温度 T_u	573 (K)	
可燃物の熱分解温度 T_p	573 (K)	

連立することで次のように表される。

$$T_i^{(N+1)} = T_i^{(N)} + \frac{\dot{Q}_{B,i} + \dot{Q}_{EX,i} - \sum_j \dot{Q}_{L,j} - \sum_j c_p \dot{m}_{ji} (T_i - T_j) - c_p \dot{m}_{B,i} (T_i - T_p)}{c_p \rho_i V_i} \Delta t \quad (3-45)$$

$$Y_{X,i}^{(N+1)} = Y_{X,i}^{(N)} + \frac{\dot{\Gamma}_{X,i} - \sum_j \dot{m}_{ji} (Y_{X,i} - Y_{X,j}) - \dot{m}_{B,i} Y_{X,i}}{\rho_i V_i} \Delta t \quad (3-46)$$

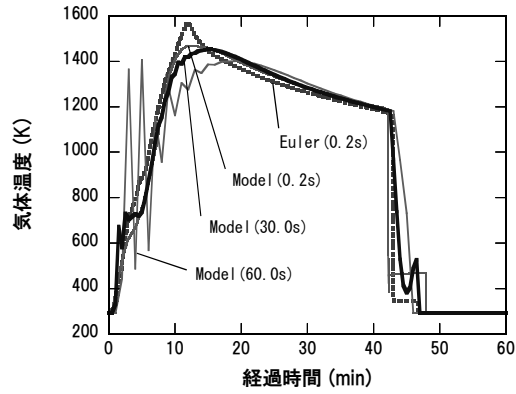
3.4.2 計算結果とその考察

図 3-11 は、本モデルによる計算結果（実線）を、オイラー法を用いた場合の計算結果（点線）と比較したものである。

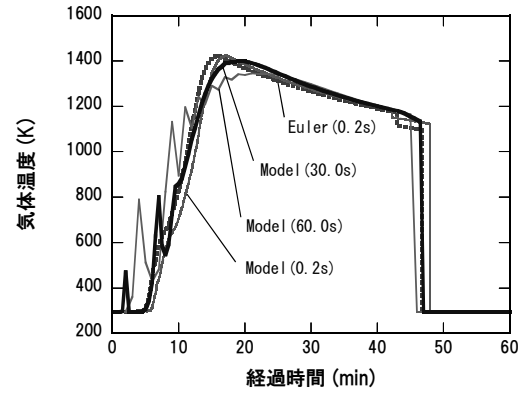
各階の気体温度は、時間刻みを 60.0sec に取った場合を除けば、計算方法によらず概ね一致する結果が得られた。時間刻みを 30.0sec や 60.0sec と長めに取った場合の計算結果では、計算開始から 20min の間で上下動が見られ、時間刻みが長いほど振動は大きい。式 (3-26) から、開口部材の軟化が始まる時の気体温度は約 420K (150℃)、完全に脱落する時の気体温度は約 675K (400℃) と算出されることに注意すると、気体温度の振動が現れ始める時間帯は、火災加熱によって開口部材の損傷が始まる時間帯とほぼ一致し、開口部材の脱落（損傷の終了）によって、振動は収束方向へ進むことが伺える。時間刻みが大きいほど開口部の面積変化は急激になり、その分開口流量も急変することになる。その結果、式 (3-13) における分母と分子の大きさのバランスが崩れ、気体温度の予測にその影響が及んだものと考えられる。

化学種（酸素、可燃性ガス）の質量分率も、時間刻みを 60.0sec に取った場合を除けば、一階の計算結果で幾分の誤差が見られるものの、全体的には類似する結果となった。オイラー法を用いた一階の計算結果によると、室内の酸素は計算開始から約 5min 後に底を尽いたが、一方で、可燃性気体の一部が燃焼によって消費されず室内で余り始めたことが分かる。その後、壁の燃え抜けが進んだことで、約 12min 後には室内に十分な量の酸素が供給され、可燃性気体は燃焼によって完全に消費され始めた。このような化学種濃度の変化は、本モデルによる計算結果には見られず、その誤差は計算開始から 20min の間で大きいことが分かる。このことは、本来室内の状態が急激に変化する火災初期についても、本モデルでは定常状態に近似したことに影響を受けているものと考えられる。なお、二階の計算結果では、計算終了時点まで常に酸素が余剰な状態であり、可燃性気体の質量分率には変化が見られない結果となった。

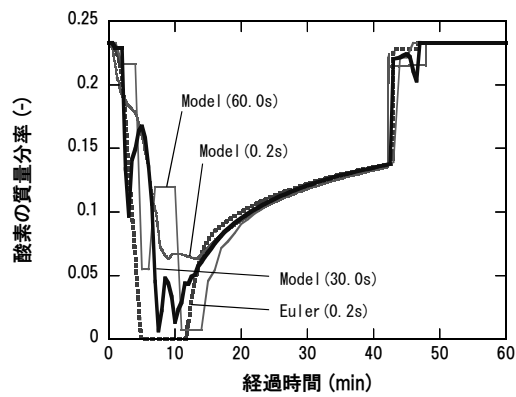
本モデルによる計算結果を見ると、化学種の質量分率については非定常計算との間に誤差が見られるものの、気体温度については時間刻みを 30.0sec と長めに取っても良好な予測が可能であるものと考えられる。式 (3-34) や (3-38) から分かるように、市街地火災の拡大を支配する輻射熱や熱気流による温度上昇はそれが保有する熱量によって決定されるが、その熱量の多くは気体温度に依存する。このことを踏まえると、本章で定式化した準定常モデルは、市街地火災の延焼予測という目的を妥当に果たすものと期待できる。



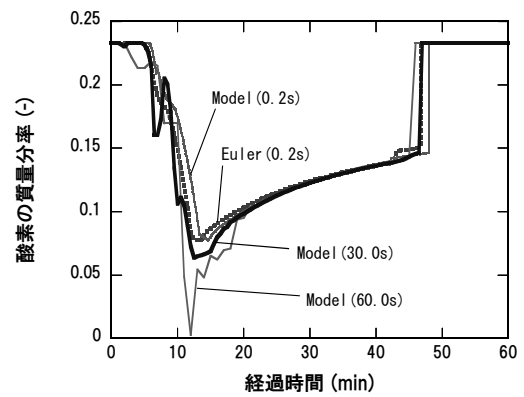
(a-1) 気体温度(1 階)



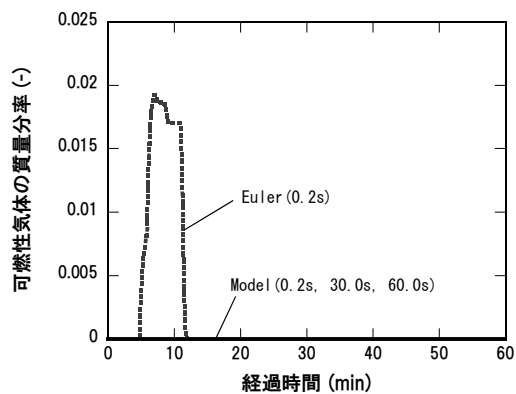
(a-2) 気体温度(2 階)



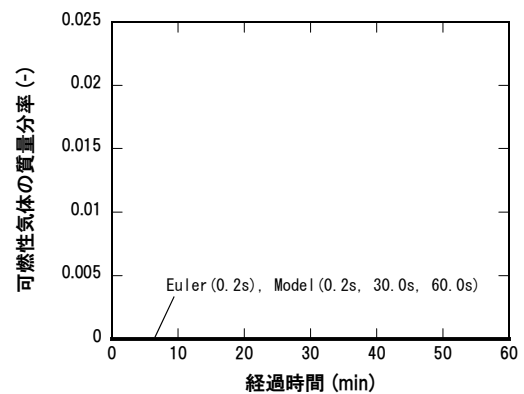
(b-1) 酸素の質量分率(1 階)



(b-2) 酸素の質量分率(2 階)



(c-1) 可燃性ガスの質量分率(1 階)



(c-2) 可燃性ガスの質量分率(2 階)

図 3-11 準定常モデルとオイラー法の比較

3.5 延焼モデルの予測精度と計算負荷の検証

ここでは、これまでに定式化した延焼モデルを過去の市街地火災に適用することで、モデルの全体的な予測精度と計算負荷について検証する。具体的には、詳細な被災調査報告によって当時の状況が把握しやすく、計算に必要なデータが比較的容易に入手可能な酒田市大火（1976）をとりあげ、数値シミュレーションによる計算結果を、当時の調査報告および既往の延焼モデル[10]と比較することで、モデルの有用性について検討を加える。

3.5.1 酒田市大火の概要

1976 年 10 月 29 日の夕刻に、酒田市内の繁華街の一映画館から出火した火災は、折からの雨まじりの強風にあおられて、市街地の広範な領域を延焼する市街地大火へと拡大した。酒田市大火では、強風に吹き倒された火災気流や飛び火による延焼が著しく、出火から翌早朝の鎮火までのおよそ 12 時間で、22.5ha の区域と 1,774 棟の建物が焼き尽くされた。被災前の酒田市の全景を撮影したものを図 3-12 に示す。図 3-12 では被災した範囲を点線で

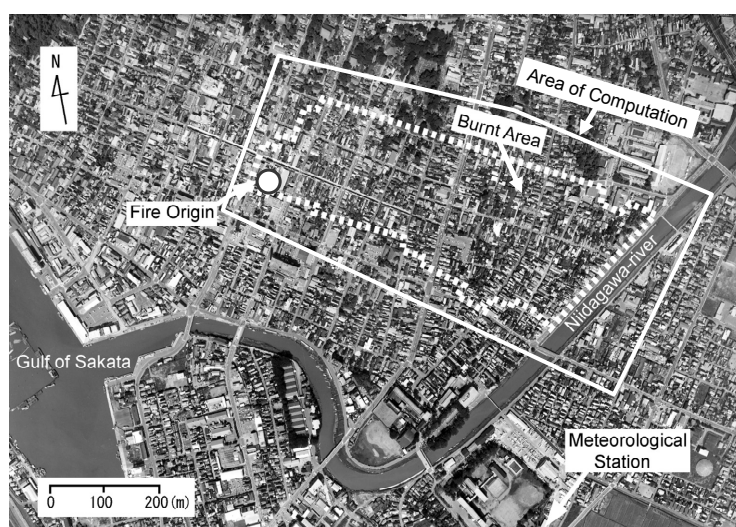


図 3-12 酒田市の全景

表 3-3 酒田市大火の概要

出火日時	1976/10/29 17:40 頃
鎮火日時	1976/10/30 5:00 頃
出火場所	山形県酒田市中町2-5-33 グリーンハウス(映画館)
出火時の気象状況	天候:にわか雨, 風向:西南西, 風速:12.2m/s 気温:8.5℃, 相対湿度:73%
焼失面積	焼失区域面積:22.5ha (焼失建物面積:15.2ha)
焼失棟数	1,774棟

囲ってある。火災は出火建物を起点にして東南東の方角に拡大し、800m 程離れた新井田川（幅約 50m）に及んだ後、焼け止まった。表 3-3 はこのような酒田市大火の概要を整理したものである[21]。

火災当時の気象状況は、被災地域に近い酒田測候所の観測結果[22]によると、出火から鎮火までの外気温の測定値の平均は 9.2℃、市街地風は出火から鎮火までの間で 10.0m/s に近い風が吹いており、その方向は西北西の風が支配的であった。なお、酒田測候所の風速計の測定高さは約 13m である。また、火災当時は降雨も観測されており、雨量としてははにわか雨程度であるが、火災拡大の抑制には幾分の寄与があったものと考えられる。

3.5.2 計算条件

表 3-4 に計算を行うにあたって設定した条件を示す。本モデルの計算時間刻みは 3.4 項における検討から 30.0sec、既往モデルは 0.2sec と設定した。出火から鎮火までの気象条件については、酒田測候所で観測された気象記録[22]に基づいて設定した。ただし、外気温の変動が少なかったことから、10℃として一定値をとるものとした。

計算領域については、図 3-12（実線）に示すように当時の被災範囲の外側に設定した。その結果、計算領域内に建つ建物数は 2,158 棟となり、その形状、階数、構造に関する情報は、当時の都市計画図から読み取った。ただし、建物の構造形式は堅牢、非堅牢の二種類に分類し、それぞれの建物構造の燃焼特性は表 3-5 のように設定した[20]。外壁面に付随する開口部の大きさについては、壁面積に対する比率 η を建物の隣棟間隔 r を用いて次のようにモデル化した。

$$\eta = \begin{cases} 0.02 & (r < 4.0) \\ 0.3 & (4.0 \leq r < 7.2) \\ 0.35 & (7.2 \leq r) \end{cases} \quad (3-47)$$

表 3-4 計算条件

	本モデル	既往モデル
計算時間ステップ Δt	30.0 sec	0.2 sec
火災性状の予測手法	準定常計算	オイラー法
風速・風向	酒田測候所による気象記録	
外気温 T_{∞}	283 K	
計算対象建物数	2,158 棟	
検査体積	各階の占有体積	
建物の構造形式の分類	2 種類（堅牢、非堅牢）	
飛び火の扱い	発生地点と時刻を計算条件として設定	
消防活動の効果・降雨の影響	考慮しない	
可燃物の燃焼面積の成長係数 α_F	1.0×10^{-3} kW/mK	
酸素の単位量発熱量 ΔH_0	13,100 kJ/kg	
可燃性気体の発熱量 ΔH_F	17,300 kJ/kg	
周辺外気の酸素の質量分率 $Y_{0,\infty}$	0.233	

ただし、開口部の高さは一様に 1.5m とした。なお、複数階から成る建物には階段といった上下階をつなぐ堅穴部が存在することになるが、ここでは、その大きさを一様に 3.0m² として計算を行った。

酒田市大火では、飛び火による延焼がいくつか確認されているが、本計算では、飛び火の発生地点と時刻を計算条件として与えることで、新たな出火点として扱った。なお、消防活動や降雨による延焼火災への影響については、考慮しないものとした。

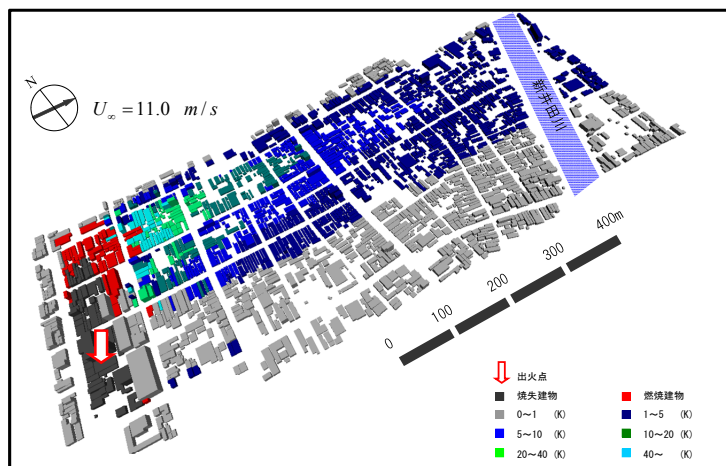
表 3-5 設定した熱物性値

		非堅牢	堅牢
収納可燃物密度		30 (kg/m ²)	30 (kg/m ²)
固定可燃物密度		60 (kg/m ²)	0 (kg/m ²)
固定可燃物の初期露出表面積比		0.2	0
壁	厚み	12 (mm)	18 (mm)
	熱伝導率	0.15×10^{-3} (kW/mK)	1.51×10^{-3} (kW/mK)
	輻射吸収率	1	1
	対流熱伝達率	0.01 (kW/m ² K)	0.01 (kW/m ² K)
	比重	500 (kg/m ³)	2200 (kg/m ³)
	比熱	1.8 (kJ/kgK)	0.9 (kJ/kgK)
	燃え抜け時間	30 (min)	燃え抜けなし
	燃え抜け潜熱	5000 (kJ/kg)	なし

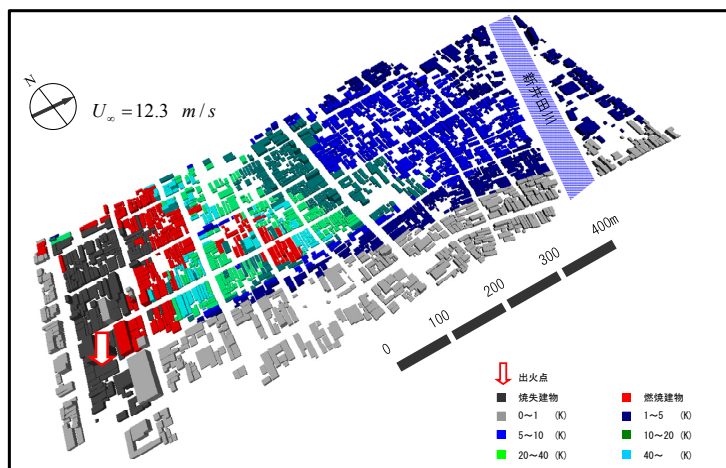
3.5.3 計算結果とその考察

図 3-13 は、本モデルによって計算された延焼火災の様子と熱気流による温度上昇の分布を示したものである。ここでは、出火から 3 時間後、4 時間後、および 5 時間後の様子を示してあり、赤い部分が燃焼中の建物に、黒い部分が焼失した建物に、矢印が出火点となった建物に相当する。図から、出火点から発生した火災が隣接建物へ次々に延焼を起こし、燃焼領域を拡大していった様子が分かる。火災建物は、出火点付近もしくは飛び火の発生地点付近から順に燃え尽きたため、火災前線の近くには基本的に帯状の燃焼領域が形成された。一方、熱気流による温度上昇を受ける建物は風下側に分布しており、燃焼領域に近いほど温度上昇は大きく、反対に燃焼領域から遠ざかるほど温度上昇は小さくなった。当時は 10m/s を超える強風が吹いていたこともあって、熱気流に曝される範囲は風下側数 100m にも及ぶことが分かる。このことから、強風下の熱気流が風下側の住民の避難行動に何らかの制限を与える要因であることが伺える。

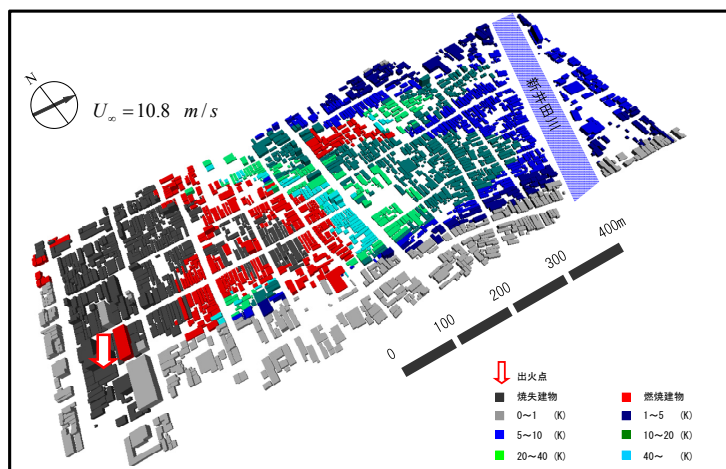
図 3-14 は、本モデルと既往モデルによって計算された火災前線の移動の様子を、聞き取り調査から明らかになった当時の様子[21]と比較したものである。ここでは、出火点となった建物の位置を○印で、飛び火の発生した位置を●印で示してある。市街地風の出火時の風向きは西南西、20 時から翌朝 4 時までは西北西であったことが報告されているが、本モデルによって計算された火災前線の進行方向もこれに対応して風下方向に大きくなった。



(a) 出火から3時間後

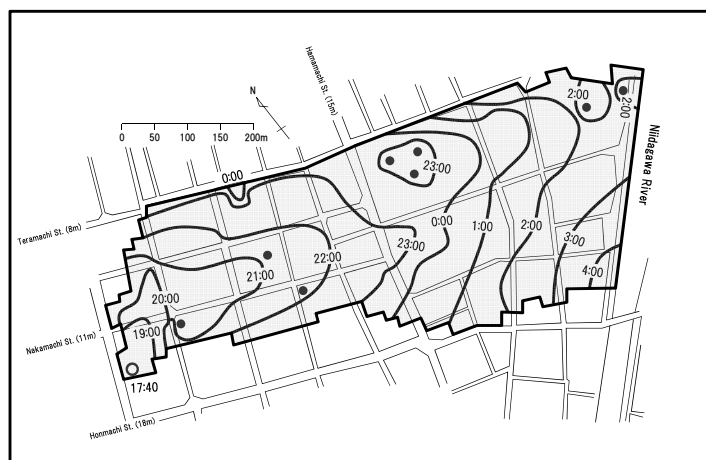


(b) 出火から4時間後

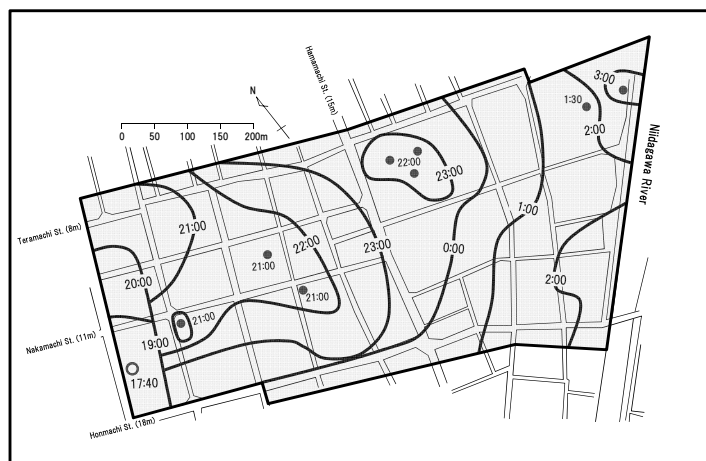


(c) 出火から5時間後

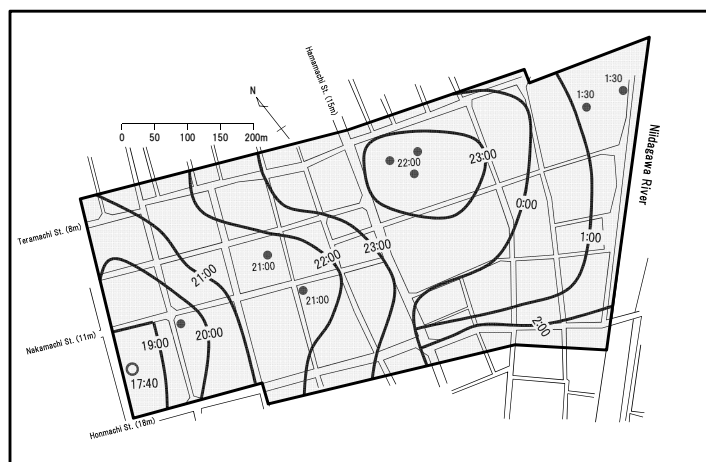
図3-13 延焼火災と熱気流の様子



(a) 聞き取り調査[21]



(b) 本モデル



(c) 既往モデル

図 3-14 火災前線の移動の様子

ただし、本モデルによる火災前線の通過範囲は調査報告に比べて大きく、延焼火災に巻き込まれた範囲は過大に評価される結果となった。これらの主要な要因として、次のことが挙げられる：

- ・ 計算を行うにあたって設定した開口部の条件の信頼性に限界があること
- ・ 建物の構造形式を堅牢と非堅牢の二種類のみに分類していること
- ・ 大火時に降っていた雨が火災の燃焼や隣接建物への拡大に及ぼす影響を考慮していないこと
- ・ 大火時には公設の消防によって大規模な消火活動が行われたが、その効果を考慮していないこと

特に、出火から 24 時頃までの間で、風横方向の延焼範囲に大きな違いが見られるのは、消火活動が専ら風横方向から行われたことに関連しているものと考えられる。なお、本モデルと既往モデルの間では、火災拡大の定性的な傾向に殆ど違いがない。最終的に鎮火した時刻は、調査報告の 10/30 5:00 頃に対し、本モデルで 10/30 4:35、既往モデルで 10/30 4:10 と計算された。一方、最終的に焼失した建物数は、調査報告の 1,774 棟に対し、本モデルで 1,973 棟、既往モデルで 1,959 棟と計算された。火災の継続時間や被災建物の数は両モデルでほぼ等しく、調査報告に比べて危険側に予測されたことが分かる。

表 3-6 は、酒田市大火の延焼計算に要した時間と、その際にメモリー内に確保された情報領域のサイズについて、本モデルと既往モデルを比較したものである。ただし、ここでの情報領域のサイズは、計算にあたって宣言した変数群の情報量から推計したため、実際に確保された領域のサイズよりも小さい可能性がある。なお、本計算には、Intel Core 2 Duo Processor E6600（動作周波数 2.4GHz）、メモリー 1,024MB のパーソナルコンピューターを使用した。本モデルを使用した場合の計算時間は 8sec であり、既往モデルの約 130 倍の速度で計算できたことが分かる。ただし、一ステップの計算に要した平均時間については、本モデルが既往モデルに比べて幾分大きくなる結果となった。この要因としては、計算プログラムの仕様の違いなども考えられるが、主に、ニュートン法を用いた基準圧力計算（式 3-25）の際に、時間刻みの大きな本モデルほど初期値が厳密解から遠くに存在するため、解の収束にかかる反復計算の回数が大きくなることが考えられる。一方、本モデルを使用した場合の情報領域のサイズは約 11MB と推計され、既往モデルのおよそ 15%に削減できたことが分かる。

表 3-6 計算速度と情報量の比較

	本モデル	既往モデル
計算時間刻み	30.0 sec	0.2 sec
焼失建物数/計算対象建物数	1,973/2,158	1,959/2,158
出火から鎮火までの時間	10 hrs 55 min	10 hrs 30 min
時間ステップの合計	1,310	189,000
計算に要した時間	8 sec	1,080 sec
1ステップ計算の平均時間	0.0061 sec	0.0057 sec
確保した情報領域の推計値	11.39 MB	72.52 MB

3.6 まとめ

本章では、既往の物理的延焼モデルに計算速度の高速化と情報量の軽減のための新たなアルゴリズムを導入することで、都市規模の避難シミュレーションに利用可能な延焼サブモデルの定式化を行った。このモデルでは、市街地火災を複数の建物火災の集合とみなし、他の建物火災の熱的影響下における個々の建物の火災性状を予測することで、都市全体の延焼性状へとつなげる。このとき、市街地火災の拡大現象は以下の二つの現象に分解される：

(A) 建物内部の火災現象

(B) 建物間の火災拡大現象

建物内部の火災性状を予測するにあたっては、一層ゾーンモデルの概念に基づいた定式化を行った。このとき、火災の状態を準定常状態に近似することで、時間刻みを陽に含まない物理量の時系列予測式を導いた。また、次の計算上の簡略化を行うことで、計算に必要な情報量の軽減を図った：

- 複数の室で分割される建物内部の空間構成を無視し、火災性状の計算単位となる検査体積を各階の占有体積に設定する
- 開口部は外壁面および上下階をつなぐ位置に一部ずつ設定し、ガラスといった開口部材は外壁面の開口部にのみ存在する
- 検査体積を構成する複数の壁を一枚の壁で代表させる（開口部材についても同様）

一方、建物間の火災拡大現象を支配する要因については、市街地風によって飛散する火の粉（飛び火）を除いた次の二つの要因を考えた：

- 燃焼建物からの輻射
- 燃焼建物の風下側に形成される熱気流

輻射および熱気流による火災拡大のモデル化にあたっては、基本的に既往の物理的延焼モデルの考え方を踏襲することで、いずれも模型実験等により既に精度が検証されたモデルを利用することができた。このとき、建物間の延焼はこれらの要因の作用の結果、次のいずれかが満たされた場合に生じるものと考えた：

- 開口を經由して室内に入射する熱流束が限界値を超えた場合
- 可燃性外装材の温度がその熱分解温度を上回った場合

このように定式化された延焼モデルの妥当性を検証することを目的として、まず仮想的な建物を想定した火災シミュレーションを行い、オイラー法による計算結果との比較を行った。その結果、本モデルに導入した準定常近似アルゴリズムは、計算刻みを大幅に拡張しても、気体温度を良好に予測可能であることが示された。

最後に、本モデルを酒田市大火（1976）に適用し、数値シミュレーションによる計算結果を当時の調査報告および既往の延焼モデルと比較することで、モデルの全体的な予測精度と計算負荷について考察した。これによると、火災の拡大速度、および、延焼火災に巻き込まれた領域は調査報告に比べて過大に評価されたものの、火災前線の移動の様子は調査報告と類似する結果となった。また、計算速度や計算に必要な情報量の点で、既往の延焼性状予測モデルを大幅に改善した。このようなことから、本章で開発した延焼モデルは

数十万棟規模の市街地を対象とした延焼計算を高速で可能にし、都市避難シミュレーションのためのサブモデルとして利用可能となることが期待される。

参考文献

- [1] 浜田稔: 火災の延焼速度について, 火災の研究I, 1951
- [2] 堀内三郎: 建築防火, 朝倉出版, 1972
- [3] 藤田隆: 火災の延焼モデルとシミュレーション, 災害の研究VIII, pp.380-393, 1975
- [4] 建設省: 都市防火対策手法の開発, 建設省総合技術開発プロジェクト, 1982
- [5] 保野健治郎・高井広行・難波義郎: ロジスティック曲線による建物火災の延焼速度式に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, Vol.311, pp.137-144, 1982
- [6] 消防研究所: 実家屋群による大規模火災対策の研究調査報告書, 1980
- [7] 保野健治郎・難波義郎・坊池道昭: 地震火災の延焼速度式に関する基礎的研究, 日本火災学会論文集, Vol.44, No.1/2, pp.15-23, 1996
- [8] 糸井川栄一・塚越功: 飛火を考慮した市街地火災の確率的延焼モデル, 第 23 回日本都市計画学会学術研究論文集, pp.469-474, 1988
- [9] まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発, 国土交通省総合技術開発プロジェクト, 2003.3
- [10] 樋本圭佑・田中哮義: 都市火災の物理的延焼性状予測モデルの開発, 日本建築学会環境系論文集, No.607, pp.15-22, 2006.9
- [11] 大宮喜文・田中哮義・若松考旺: 可燃物条件を考慮した区画火災性状予測モデルの開発, 日本建築学会計画系論文集, No.487, pp.1-8, 1996
- [12] 大宮喜文・佐藤雅史・田中哮義・若松考旺: 区画内における可燃物の燃焼速度と噴出火災の発生限界, 日本建築学会構造系論文集, No.469, pp.149-158, 1995.3
- [13] 松山賢: 性能的火災安全設計に用いる火災性状モデルの構築と火災安全性能評価への応用, 東京理科大学学位論文, 2000
- [14] 田中哮義: 改訂版 建築火災安全工学入門, 日本建築センター, 2002.1
- [15] 日本建築学会: 換気設計 設計計画パンフレット 18, 彰国社, 1976
- [16] 原田和典・辻本誠・細沢貴史: 熱流時間面積が等しい等価火災時間, 平成 10 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.112-115, 1998
- [17] 樋本圭佑・土橋常登・田中義昭・田中哮義: 給気した火災室の開口から噴出する火炎・熱気流の温度と軌跡 -開口噴出火炎・熱気流による火災拡大に関する研究 その 1-, 日本建築学会環境系論文集, No.598, pp.1-8, 2005.12
- [18] ISO/TC92/SC4/WG9, No.104, 2008.9
- [19] 樋本圭佑・土橋常登・田中義昭・田中哮義: 開口上方壁面の影響を考慮した噴出火炎・熱気流の軌跡モデル -開口噴出火炎・熱気流による火災拡大に関する研究 その 2-, 日本建築学会環境系論文集, No.607, pp.1-6, 2006.9
- [20] 日本建築学会編: 建築設計資料集成 1 環境, 丸善, p.119, 1978.6
- [21] 自治省消防庁消防研究所: 酒田市大火の延焼状況等に関する調査報告書, 1977.10
- [22] 酒田市: 酒田市大火の記録と復興への道, 1978.3

第 4 章

住民による消火活動を考慮した 飛び火現象の確率論的予測モデル

4.1 はじめに

第 3 章では、避難性状予測モデルの入力条件として必要な燃焼領域の時間変化を火災拡大の物理的知見に基づいて予測可能な手法を整備した。この中では、建物間の火災拡大を支配する要因として、(1) 燃焼建物からの輻射と、(2) 燃焼建物の風下側に形成される熱気流、を考えている。ただし、市街地風によって飛散する火の粉については、物理的な知見の不足により定式化を行えなかった。

一般的に、市街地火災の拡大は気象条件に大きく左右されることが知られており、中でも、強風下の火の粉による飛び火現象は延焼速度の著しい増加をもたらすものと考えられている。燃焼建物から放出された火の粉は、高温の浮力流によって上空へ舞い上げられ、燃焼を継続しながら風下側に流される。その後、上昇流の影響が小さくなると高度を低下させ、最終的に建物や地表面に落下する。落下地点に適当な可燃物があれば、火の粉の持つ熱エネルギーによって着火が引き起こされる。

市街地風に流されるといった点では熱気流も同様であるが、その温度上昇は $10^1 \sim 10^2 \text{K}$ のオーダーであり、直接的に可燃物の着火をもたらす程には高くない。一方で、強風下の火の粉は燃焼建物から離れた地点に延焼を発生させ、その結果、燃焼領域は非連続的に拡大していくことになる。このような火の粉による燃焼領域の急拡大は、住民の避難に大きな影響を与えるものと考えられる。このため、住民避難の予測には、飛び火現象の合理的なモデル化は避けて通れない。

一般的に、飛び火による建物間の延焼は、(1) 火の粉の発生、(2) 火の粉の飛散、(3) 火の粉の付着による可燃物の着火、という三つの現象に分解され、個々の現象については、これまでもいくつかの研究がなされている[2-11]。飛び火による建物間の延焼を精度良く

予測するには、これらの現象を順々に予測することで火の粉の挙動を追えばよい。しかし、現状では火の粉の挙動に関する物理的な知見が乏しいことから、確率論的なモデルを採用して飛び火による延焼の発生を評価することが自然なアプローチと考えられる[1,12]。例えば樋本ら[1]は、飛び火による延焼確率 p_b が火の粉の飛散確率 p_e に比例するものとみなし、モデル中に含まれるパラメータ（定数 α ）を浜田式[13]から導かれる延焼速度と比較することで推定している。

$$p_b = \alpha \cdot p_e \quad (4-1)$$

ただし、パラメータの推定に用いられた浜田式は主に木造市街地に対して適用可能な経験式であり、樋本らによるモデルが建物構成の多様な現代の市街地に対しても適用可能であるかは明らかでない。また、過去の市街地大火[14]では、周辺住民が飛来した火の粉を屋根の上でたたき消したり、ホースやバケツで水を撒くといった消火活動によって飛び火を防いだ例が数多く報告されている。このため、こうした住民による消火活動の影響を定式化し、モデルに組み込む必要がある。

そこで本章では、飛び火による建物間の延焼について新たな確率論的モデルの定式化を行う。さらに、酒田市大火の延焼シミュレーションを行い被災調査記録との比較を行うことで、モデルによる飛び火現象の再現性について検証した。

4.2 飛び火による建物間延焼の確率論的モデル

図 4-1 は、本稿における飛び火による建物間延焼の確率論的モデルの概念を示したものである。市街地火災時には、燃焼建物の構造部材や収納家具などの可燃物の一部が無数の火の粉となり、高温の熱気流によって建物上空へと巻き上げられる。その後、火の粉は市街

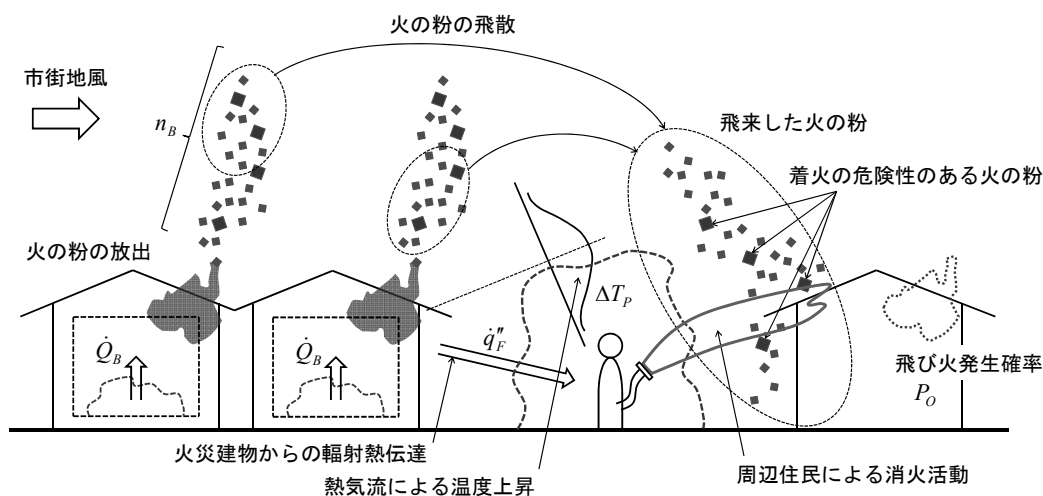


図 4-1 飛び火による建物間延焼の確率論的モデルの概念

地風によって燃焼建物周辺に飛散し、瓦屋根の隙間や軒裏などから建物内部へ侵入する。このうちの大半は可燃物への着火をもたらすことなく自然に鎮火し、また一部は周辺住民の消火活動によって未然に消火されるものの、残りの火の粉は可燃物に付着することで新たな出火をもたらすことになる。本モデルでは、ある時間 Δt の間に燃焼領域から発生する火の粉によってある建物 j で延焼が起こる確率 $P_{o,j}$ （以降では、飛び火発生確率と呼ぶ）を定義する。飛び火による延焼の発生を評価するには、時間 Δt を進めるごとに、

1. 燃焼領域の風下側に位置する個々の建物 j について飛び火発生確率 $P_{o,j}$ を計算する
2. 個々の建物 j について $[0,1]$ の一様乱数 u_j を発生させ、 $u_j \leq P_{o,j}$ が満たされた場合に建物 j で延焼が起こる

ものとする。

4.2.1 飛び火発生確率

飛び火発生確率 $P_{o,j}$ を定義するにあたっては、まず、燃焼建物から放出される一つの火の粉 i によって、ある風下側建物 j へ延焼が起こる確率 $p_{o,ij}$ を考える。その後、燃焼領域から発生する複数の火の粉の影響下での延焼確率を考えることで、飛び火発生確率 $P_{o,j}$ へと拡張する。図 4-2 は、一つの火の粉に着目した場合の飛び火シナリオをイベントツリー形式で示したものである。ここでは、一つの火の粉による飛び火シナリオが、次の五つの要素から構成されるものとみなす：

- (A) 燃焼建物からの火の粉の放出
- (B) 風下側建物への火の粉の飛散
- (C) 火の粉の落下位置における可燃物の状況
- (D) 火の粉の持つ潜在的な危険性
- (E) 周辺住民による火の粉の消火活動

このとき、一つの火の粉による延焼の発生は、(1) 火の粉が建物に飛来し、(2) 火の粉の落下位置に可燃物が存在し、(3) 火の粉が可燃物の着火を引き起こす危険性を潜在的に有しており、(4) 火の粉が周辺住民によって消火されない、という過程で表わすことができ

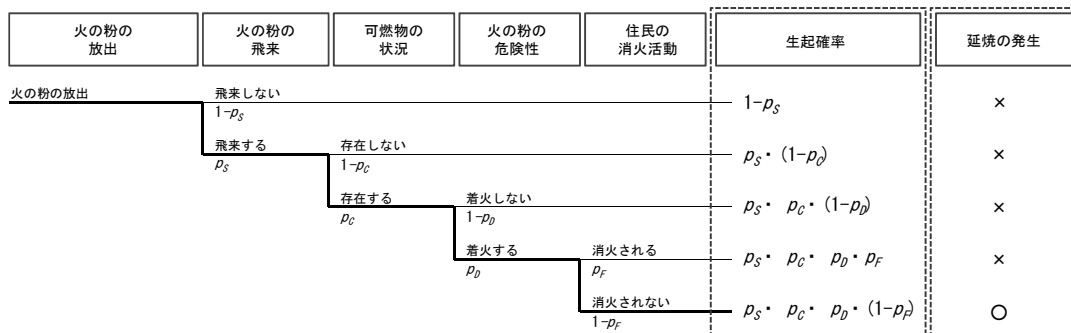


図 4-2 一つの火の粉による飛び火シナリオ

る. このことから, 一つの火の粉によって延焼が発生する確率 $p_{O,ij}$ は次のように表わされる.

$$p_{O,ij} = p_{S,ij} \cdot p_{C,ij} \cdot p_{D,ij} \cdot (1 - p_{F,ij}) \quad (4-2)$$

ここに, $p_{S,ij}$ は火の粉が建物に飛来する確率, $p_{C,ij}$ は火の粉の落下位置に可燃物が存在する確率, $p_{D,ij}$ は火の粉が可燃物の着火を引き起こす危険性を潜在的に有している確率, $p_{F,ij}$ は火の粉が周辺住民によって消火される確率である. ただし現時点では, 落下位置での可燃物の状況や火の粉の持つ潜在的な危険性に関する知見が乏しく, 合理的なモデル化を行うことは難しい. このため本モデルでは, 可燃物の存在確率 $p_{C,ij}$, および, 火の粉が着火の危険性を有している確率 $p_{D,ij}$ は一定値をとるものとみなす.

$$p_{C,ij} = \alpha_p, \quad p_{D,ij} = \beta_p \quad (4-3)$$

ただし, α_p, β_p は定数である.

燃焼領域の火災建物群から放出される火の粉の数を n_F 個とすると, これらの火の粉によってある建物へ延焼が起こる確率 (飛び火発生確率) $P_{O,j}$ は, 少なくとも一つの火の粉によって延焼が起こる確率に等しいことから, 次のように表わされる.

$$P_{O,j} = 1 - \prod_{i=1}^{n_F} (1 - p_{O,ij}) \quad (4-4)$$

ここで, ある燃焼建物 k から放出される火の粉の数を $n_{B,k}$ 個, 燃焼建物の数を m 棟とすると, 式 (4-4) は次のように書き直される.

$$P_{O,j} = 1 - \prod_{k=1}^m \prod_{i=1}^{n_{B,k}} (1 - p_{O,ij}) = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - p_{O,ij})^{n_{B,k}} \quad (4-5)$$

ただし, 燃焼建物から放出される個々の火の粉の延焼発生確率 $p_{O,ij}$ は一様であるものとみなした. このとき, 一つの火の粉によって延焼が発生する確率 $p_{O,ij}$ が

$$p_{O,ij} \ll 1 \quad (4-6)$$

と仮定すると, 式 (4-5) で表わされる飛び火発生確率 $P_{O,j}$ は一部を次のように線形近似できる.

$$P_{O,j} \approx 1 - \prod_{k=1}^m (1 - n_{B,k} \cdot p_{O,ij}) \quad (4-7)$$

4.2.2 火の粉の発生量

ある時間 Δt の間に燃焼建物から発生する火の粉の個数 $n_{B,k}$ は，燃焼が激しい程発生量も増加するものと考え，燃焼建物の発熱速度 $\dot{Q}_{B,k}$ の累積値に比例するものと仮定する．

$$n_{B,k} = \gamma_p \cdot \int_t^{t+\Delta t} \dot{Q}_{B,k} dt \quad (4-8)$$

ここに， t は時間， γ_p は比例定数である．ただし，ここでの比例定数 γ_p は一つの火の粉の発生に必要な発熱量の逆数に相当する．

4.2.3 火の粉の飛来確率

燃焼建物から放出された火の粉がある建物に飛来する確率 $p_{S,ij}$ は，燃焼建物を原点 O' とし風向方向に x 軸，風向と直角な方向に y 軸をとった二次元座標系を考え，次式で表す．

$$p_{S,ij} = \iint p_{S,X} \cdot p_{S,Y} dx dy \quad (4-9)$$

ここに， $p_{S,X}$ は火の粉が風向（ x 軸）方向へ距離 X を飛散する確率， $p_{S,Y}$ は風向と直角な（ y 軸）方向へ距離 Y を飛散する確率， $\iint dx dy$ は風下側建物平面における面積分である．火の粉の飛散確率 $p_{S,X}, p_{S,Y}$ を予測するにあたっては，風向（ x 軸）方向への飛散確率 $p_{S,X}$ を対数正規分布，風向と直角な（ y 軸）方向への飛散確率 $p_{S,Y}$ を正規分布で近似する（図 4-3）．

$$p_{S,X} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{L,X}X} \exp\left\{-\frac{(\ln X - \mu_{L,X})^2}{2\sigma_{L,X}^2}\right\} \quad (0 < X < \infty) \quad (4-10)$$

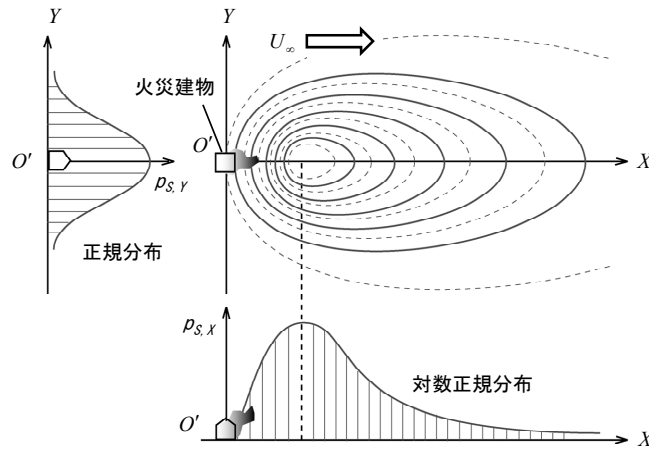


図 4-3 火の粉の飛散確率

$$p_{s,y} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{Y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (-\infty < Y < \infty) \quad (4-11)$$

ここに、 $\mu_{L,X}$ と $\sigma_{L,X}$ は x 軸方向の飛散距離 X の自然対数の平均値と標準偏差、 σ_y は y 軸方向の飛散距離 Y の標準偏差である。ただし、無風状態に近い風環境においては、燃焼建物に近い風上($x < 0$)方向にも火の粉が飛散するものと考えられるが、式(4-10)で仮定した対数正規分布ではこうした風上方向への飛散分布を再現することはできない。市街地火災時において大きな問題となるのは、燃焼建物から風下($x > 0$)方向へ長距離を飛散する火の粉と考えられる。本モデルでは、このような強風下の火の粉の飛散現象を念頭において対数正規分布を採用した。

x 軸方向、ならびに y 軸方向の飛散確率の平均値 μ と標準偏差 σ は、既往の平板状の火の粉を対象とした飛散性状シミュレーションの結果から、次のように表わされる[7]。

$$\left. \begin{array}{l} \mu_x/D = 0.47B^{*2/3} \\ \sigma_x/D = 0.88B^{*1/3} \end{array} \right\}, \text{ また, } \left. \begin{array}{l} \mu_y/D = 0 \\ \sigma_y/D = 0.92 \end{array} \right\} \quad (4-12)$$

ここに、 D は火源の代表長さ、 B^* は次式で定義される支配無次元数である。

$$B^* = \frac{U_\infty}{(gD)^{1/2}} \left(\frac{\rho_p d_p}{\rho_\infty D} \right)^{-3/4} \left(\frac{\dot{Q}_B}{\rho_\infty c_p T_\infty g^{1/2} D^{5/2}} \right)^{1/2} \quad (4-13)$$

ただし、 U_∞ は市街地風速、 g は重力加速度、 ρ_p は火の粉の比重、 ρ_∞ は外気密度、 d_p は火の粉の厚み、 c_p は定圧比熱、 T_∞ は外気温である。なお、式(4-12)に示した μ_x, σ_x を式(4-10)に代入するには、自然対数 $\ln X$ を変数にとった $\mu_{L,X}, \sigma_{L,X}$ に変換する必要がある。このとき、変換式は、

$$\mu_{L,X} = \ln \left[\frac{\mu_x^2}{\sqrt{\mu_x^2 + \sigma_x^2}} \right], \quad \sigma_{L,X} = \sqrt{\ln \left[\frac{\mu_x^2 + \sigma_x^2}{\mu_x^2} \right]} \quad (4-14)$$

4.2.4 住民による火の粉の消火確率

風下側建物に飛来した火の粉が周辺住民によって消火されるのは、(1)住民がその付近に滞在しており、(2)飛来した火の粉を認識し、(3)火の粉の消火活動を行い、(4)消火に成功する、という過程によって表わすことができる。ただし、住民による飛来火の粉の認知やその後の初期行動、および、住民の消火能力に関する知見は乏しく、合理的なモデル化を行うことは難しい。そこで、住民が火の粉の飛来した建物付近に滞在していれば一定の確率で火の粉が消火されるものと仮定し、火の粉が住民によって消火される確率 $p_{F,ij}$ を次のように表わす。

$$p_{F,ij} = \phi_p \cdot p_R \quad (4-15)$$

ただし、 ϕ_p は定数、 p_R は住民が火の粉の飛来した建物付近に滞在している確率である。

市街地で火災が発生した場合、一部の住民は熱気流や輻射熱に曝されているにもかかわらず、家財を運び出したり消火活動を行うといった財産の固執によって、生命の危険が迫る寸前までは避難を開始しないことがある[15]。ここでは、住民の滞在確率 p_R が火災からの影響に起因した避難の開始で決定されるものと考え、次のように表す。

$$p_R = 1 - p_E \quad (4-16)$$

ただし、 p_E は火災からの影響によって住民が避難を開始する確率である。本モデルでは、避難の開始を左右する火災からの影響として、(1) 人体表面への熱伝達と、(2) 高温ガスの体内吸収を考え、住民の避難開始確率 p_E を次のように表す (図 4-4)。

$$p_E = \max\left(\frac{\dot{q}_N''}{\dot{q}_{cr}''}, \frac{\Delta T_p}{T_{cr} - T_\infty}\right) \quad (4-17)$$

ただし、 \dot{q}_N'' は住民へ伝達される正味の熱流束、 \dot{q}_{cr}'' は住民が確実に避難を開始する熱流束、 ΔT_p は熱気流による温度上昇、 T_{cr} は住民が確実に避難を開始する曝露温度である。式 (4-17) は、火災からの影響が増加するにつれて避難を開始する可能性も増加し、最終的に許容可能な限界値を超えた場合には、確実に避難を開始する関係を表わしている。なお、周辺住民へ伝達される正味の熱流束 \dot{q}_N'' は、次式で表わされる (図 4-5)。

$$\dot{q}_N'' = \dot{q}_F'' + \dot{q}_\infty'' + \dot{q}_H'' - \dot{q}_B'' \quad (4-18)$$

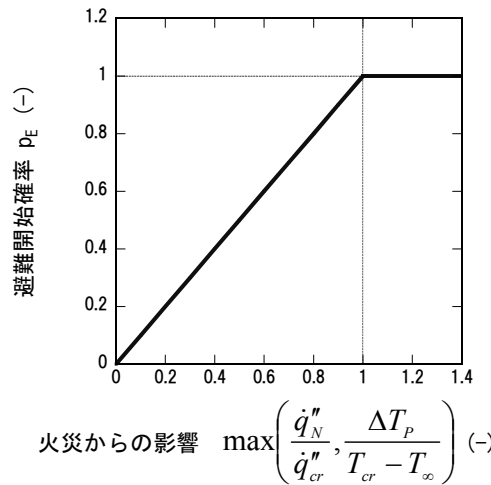


図 4-4 避難の開始確率

ただし,

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_{\infty}'' &= \sigma(T_{\infty} + \Delta T)^4 \\ \dot{q}_H'' &= h(T_{\infty} + \Delta T - T_B) \\ \dot{q}_B'' &= \sigma T_B^4 \end{aligned} \right\} \quad (4-19)$$

ここに, \dot{q}_F'' は燃焼建物から人体表面へ入射する輻射熱流束, \dot{q}_{∞}'' は周辺気体から人体表面へ入射する輻射熱流束, \dot{q}_H'' は周辺気体と人体表面の間で対流により伝達される熱流束, \dot{q}_B'' は人体表面から放射される輻射熱流束, σ はステファンボルツマン定数, h は人体表面の対流熱伝達率, T_B は人体表面の温度である.

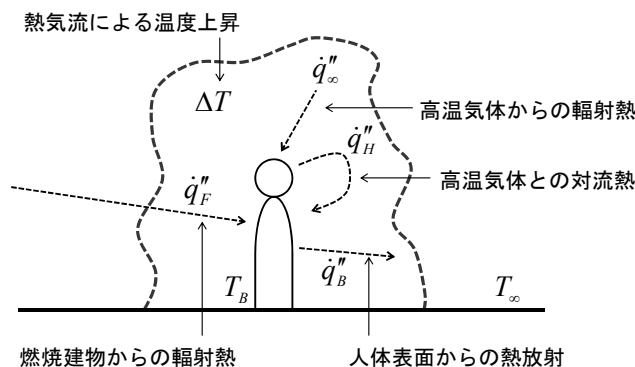


図 4-5 人体の熱収支

4.3 酒田市大火との比較による飛び火モデルの検証

ここでは, 本章で定式化を行った飛び火モデルを第 3 章で開発した延焼性状予測モデルに組み込むことで, 酒田市大火の延焼シミュレーションを行う. ただし, 飛び火の予測モデルには確率論的モデルが採用されていることから, モンテカルロ・シミュレーションによって計算結果を把握し, 延焼状況に関する当時の調査報告と比較することで, モデルの妥当性について考察する. このとき, 飛び火の発生地点とその時刻といった微視的な指標は, 調査報告との単純な比較が困難である. そこで, 当該市街地全体での飛び火の発生数や延焼速度といった巨視的な指標との比較を行う. なお, 酒田市大火の概要は第 3 章に記述した通りであるが, 被災地域内での飛び火の発生数は 17 件と報告されている. このうち, 飛び火の発生地点と時刻, および火の粉の消火の可否が全て明らかになっているものは, 6 件である[14].

4.3.1 計算条件

本稿で実施するモンテカルロ・シミュレーションの計算条件を示したものが表 4-1 である.

モンテカルロ・シミュレーションの試行回数は 500 回とし、各試行における計算時間刻みは 30.0sec とした。出火から鎮火までの気象条件については、酒田測候所で観測された気象記録[16]に基づいて設定した。ただし、外気温の変動が少なかったことから、10℃として一定値をとるものとした。また、公設消防による消火活動や降雨による延焼火災への影響については、考慮しないものとした。

飛び火による建物間延焼の確率論的モデルには、いくつかのパラメータが含まれているが、式 (4-7) で表わされる飛び火発生確率 $P_{O,j}$ を詳細に記せば次のようになる。

$$P_{O,j} \approx 1 - \prod_{k=1}^m \left[1 - \alpha_p \beta_p \gamma_p (1 - \phi_p p_R) \int_t^{t+\Delta t} \dot{Q}_{B,k} dt \int p_{S,X} p_{S,Y} dx dy \right] \quad (4-20)$$

ここでは、式 (4-20) の定数項 $\alpha_p \beta_p \gamma_p$ を定数 χ_p と置き直し、これを試行錯誤的に決定した三通りの値 0.0, 0.5×10^{-9} , 1.0×10^{-9} として計算を行う。なお、定数 χ_p が 0.0 の場合は、飛び火が発生しない条件に相当する。一方、定数 ϕ_p については、大火後のアンケート調査[15]によって、回答世帯の約 70%が注水や火の粉をはらうといった消火活動を行ったことが報告されている。そこで、定数 ϕ_p はこの値に等しいものとみなし 0.7 と設定した。また、住民の滞在確率 p_R の計算に必要なパラメータのうち、住民が避難を開始する限界熱流束 \dot{q}_{cr}'' は長谷見ら[17]に基づいて 2.0 kW/m^2 、限界曝露温度 T_{cr} は東京消防庁[18]から 313K と設定した。

計算領域については、図 4-6 (実線) に示すように当時の被災範囲の外側に設定した。その結果、計算領域内に建つ建物数は 2,158 棟となり、その形状、階数、構造に関する情報は、当時の都市計画図から読み取った。ただし、建物の構造形式は堅牢、非堅牢の 2 種類に分類し、それぞれの建物構造の燃焼特性は表 4-2 のように設定した[19]。外壁面に付随する開

表 4-1 計算条件

	(A)	(B)	(C)
飛び火係数 χ_p	0.0 kJ^{-1}	$0.5 \times 10^{-9} \text{ kJ}^{-1}$	$1.0 \times 10^{-9} \text{ kJ}^{-1}$
消火活動係数 ϕ_p	0.7		
火の粉の特性 $\rho_p d_p$	0.01 kg/m^2		
試行回数	500		
計算時間刻み Δt	30.0 sec		
風速・風向	酒田測候所による気象記録		
外気温 T_∞	283 K		
計算対象建物数	2,158 棟		
建物種別	2 種類 (堅牢, 非堅牢)		
公設消防の活動効果・降雨の影響	考慮しない		
避難を開始する限界熱流束 \dot{q}_{cr}	2.0 kW/m^2		
避難を開始する限界温度 T_{cr}	313 K		
人体の表面温度 T_B	305 K		
人体の対流熱伝達率 h	0.02 $\text{kW/m}^2\text{K}$		

口部の大きさについては、壁面積に対する比率 η を建物の隣棟間隔 r を用いて次のようにモデル化した。

$$\eta = \begin{cases} 0.02 & (r < 4.0) \\ 0.3 & (4.0 \leq r < 7.2) \\ 0.35 & (7.2 \leq r) \end{cases} \quad (4-21)$$

ただし、開口部の高さは一様に 1.5m とした。なお、複数階から成る建物には階段といった上下階をつなぐ竪穴部が存在することになるが、ここでは、その大きさを一様に 3.0m² として計算を行った。

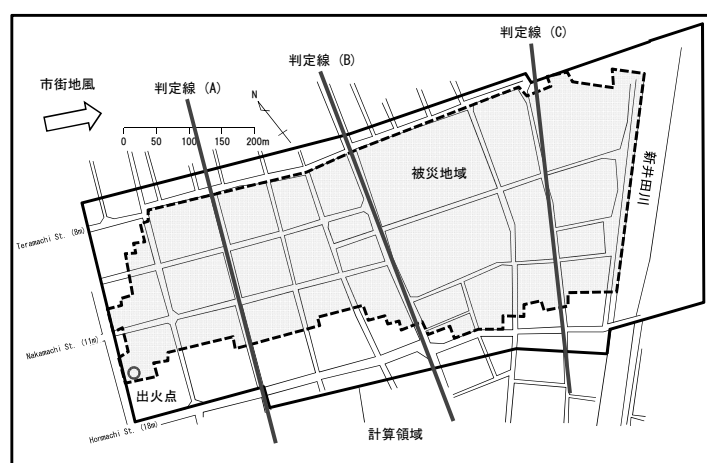


図 4-6 計算領域

表 4-2 設定した熱物性値

		非堅牢	堅牢
収納可燃物密度		30 (kg/m ²)	30 (kg/m ²)
固定可燃物密度		60 (kg/m ²)	0 (kg/m ²)
固定可燃物の初期露出表面積比		0.2	0
壁	厚み	12 (mm)	18 (mm)
	熱伝導率	0.15×10^{-3} (kW/mK)	1.51×10^{-3} (kW/mK)
	輻射吸収率	1	1
	対流熱伝達率	0.01 (kW/m ² k)	0.01 (kW/m ² k)
	比重	500 (kg/m ³)	2200 (kg/m ³)
	比熱	1.8 (kJ/kgK)	0.9 (kJ/kgK)
	燃え抜け時間	30 (min)	燃え抜けなし
	燃え抜け潜熱	5000 (kJ/kg)	なし

4.3.2 計算結果とその考察

(1) 飛び火発生確率の空間分布

$\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}$ の場合に計算された出火から 3 時間後と 6 時間後の延焼火災の一例を示したものが図 4-7 である。ここでは、出火点となった建物を矢印、焼失した建物を黒色、燃焼中の建物を赤色で示してあり、飛び火の発生地点と時刻を付記してある。また、風下側建物の単位面積あたりの 30 秒間の飛び火発生確率 $P_{o,j}$ ($1/m^2$) を色分けで示した。

出火点から発生した火災は、隣接する建物へ次々に延焼を起こし、燃焼領域を拡大していった様子が分かる。特に、高温の熱気流に曝され、火の粉が多く飛散する風下方向への拡大が目立つ結果となった。図 4-7. (a) から、市街地風によって飛散したいくつかの火の粉が、燃焼領域から風下方向へ 100m 程離れた地点に飛び火し、新たな出火をもたらした様子が分かる。燃焼建物は出火点付近もしくは飛び火の発生地点付近から順に燃え尽きたため、火災前線の近くには基本的に帯状の燃焼領域が形成される結果となった。

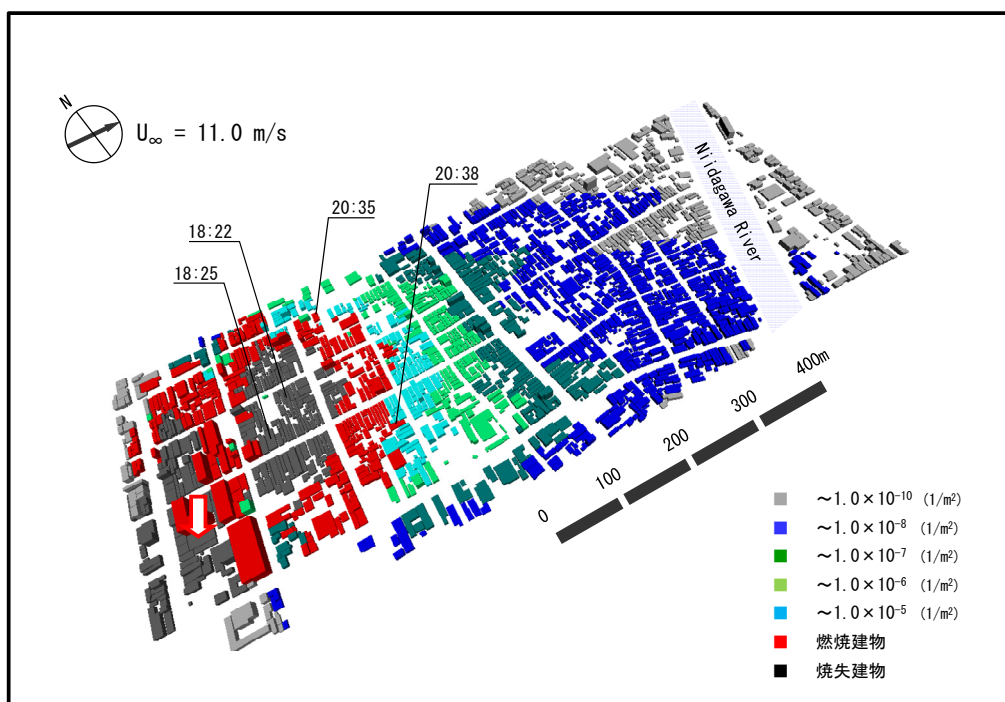
単位面積あたりの 30 秒間の飛び火発生確率は基本的に燃焼領域に近い範囲で大きく、その値は最大で 10^{-5} ($1/m^2$) 程度と計算された。図 4-7. (a) の出火から 3 時間が経過した時点では、燃焼領域が風横方向に大きく広がったため、飛び火発生確率の分布も帯状を保ちながらその値は風下方向へ減衰していることが分かる。一方、図 4-7. (b) の出火から 6 時間後の時点では、燃焼領域が二つに分かれたことで、飛び火発生確率の顕著な地域も大きく二つ存在することが分かる。この時間においては、新井田川の風下側の地域にも飛び火発生確率がある程度分布しており、飛び火による延焼の危険性が存在することが分かる。

(2) 火災前線の移動の様子

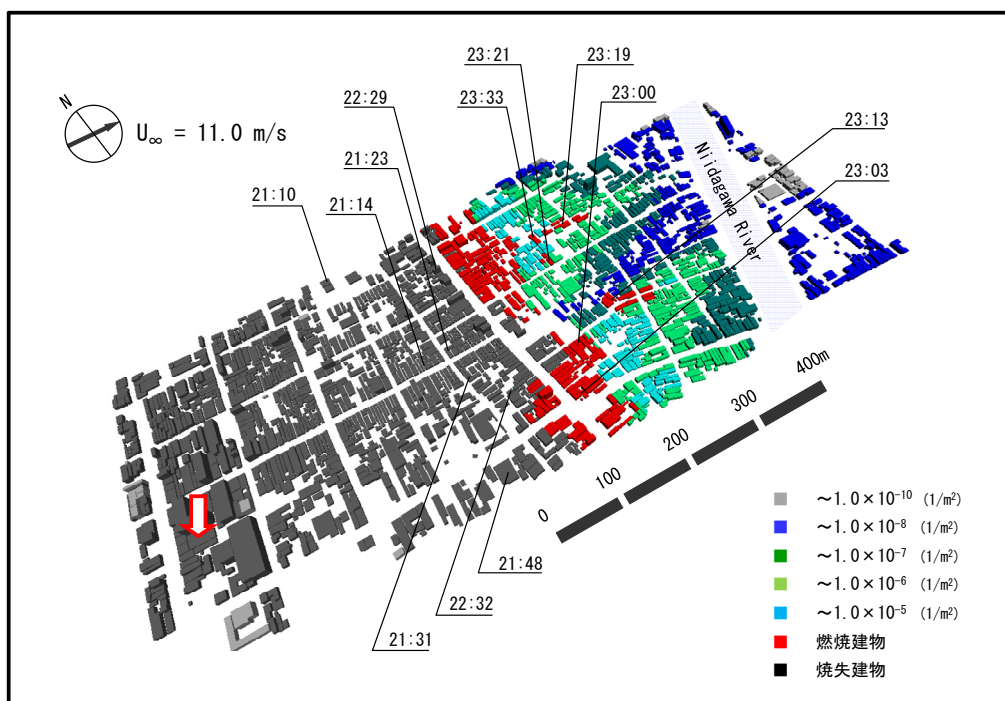
図 4-8. (a) は、聞き取り調査によって調べられた大火時の火災前線の移動の様子[14]を、図 4-8. (b, c) は、それぞれ $\chi_p = 0.0, 0.5 \times 10^{-9}$ の場合に計算された火災前線の移動の様子を示したものである。ここでは、表記した時刻における火災前線の位置を実線で、出火点となった建物の位置を○印で、飛び火の発生した建物の位置を●印で示してある。ただし、 $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}$ の場合については、全試行の計算結果のうち、飛び火の発生数が平均的な値となる例を示してある。なお、酒田市大火では 17 件の飛び火が報告されているが、図 4-8. (a) に示す聞き取り調査の結果には、発生地点と時刻、および火の粉の消火の可否が全て明らかになっている 6 件のみを示した。

当時、市街地風の出火時の風向きは西南西、20 時から翌朝 4 時までは西北西であったことが報告されているが、本モデルによって計算された火災前線の進行方向も、これに対応して風下方向に大きくなった。このうち、図 4-8. (b) に示す飛び火の発生しない条件では、風下側の建物が市街地風に流された熱気流の影響を受けるため、風下方向への拡大が支配的になっている。しかし、各時刻における火災前線の位置を見ると、基本的には飛び火の発生した条件に比べて風上側に位置し、飛び火がない分だけ火災の拡大が遅れていることが伺える。

図 4-8. (c) に示す $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}$ の場合に計算された飛び火の発生数は、計算領域全体で

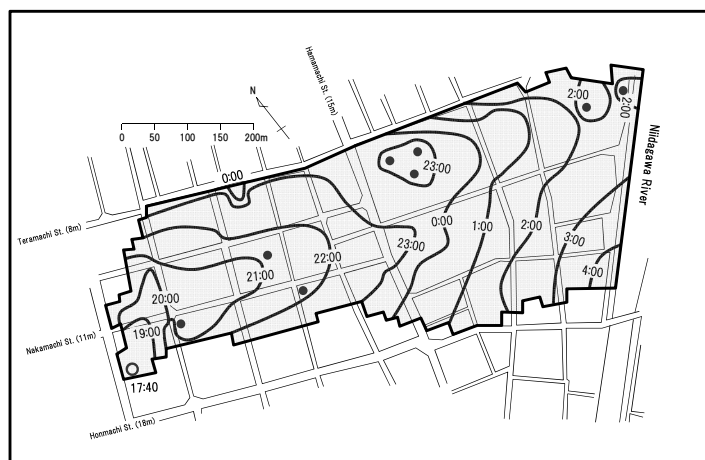


(a) 出火から3時間後



(b) 出火から6時間後

図4-7 延焼火災の様子と飛び火発生確率の分布 ($\chi_P = 0.5 \times 10^{-9}$)



(a) 聞き取り調査[14]

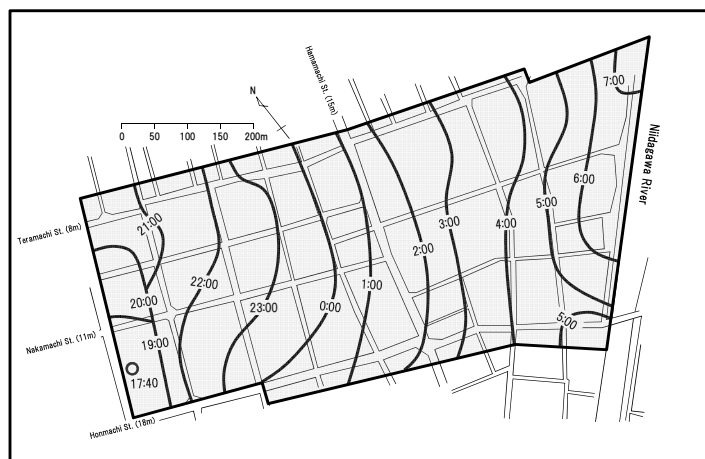
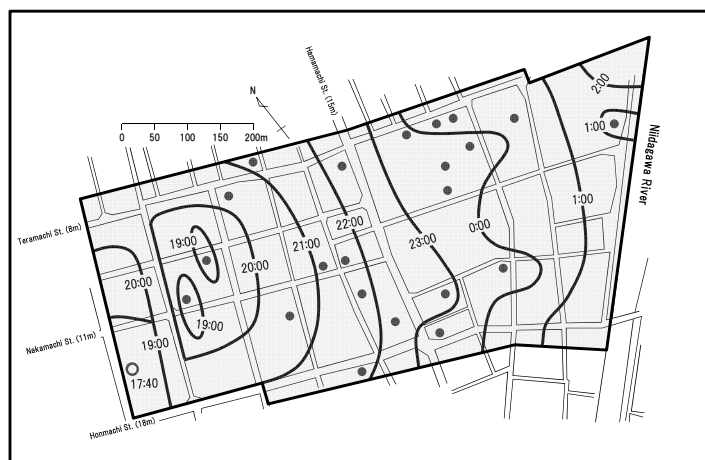
(b) $\chi_P = 0.0$ (c) $\chi_P = 0.5 \times 10^{-9}$

図 4-8 火災前線の移動の様子

22 件であり、その発生地点は燃焼領域の風下側に分布している。火災が発生した日の 19 時から 20 時までの間、および、翌日 1 時から鎮火までの間では飛び火による延焼が起らなかったものの、出火から鎮火までの間で飛び火の発生時間に大きな偏りは見られない。火災前線の間隔を図 4-8. (b) の飛び火の発生しなかった条件と比較すると、その移動速度は、燃焼領域から風下方向へ 100m 程離れて発生するいくつかの飛び火によって、大きく加速していることが分かる。本モデルでは、飛び火による延焼の発生を確率論的に予測しているが、このような火災拡大の定性的な傾向は、図 4-8. (a) に示す聞き取り調査と類似しているものと考えられる。本モデルによって計算された最終的な鎮火時間は 10/30 4:28、最終的な焼失建物数は 2,018 棟であった。これに対し、当時の調査によって報告されている鎮火時間は 10/30 5:00 頃、焼失建物数は 1,774 棟である。なお図 4-8. (c) では、最終的に延焼火災が新井田川の河岸で焼け止まる結果となったが、モンテカルロ・シミュレーションの全 500 回の試行のうち 71 回の試行については、新井田川の風下側の建物へ飛び火による延焼が発生し、火災の進行が川を越えて継続する結果となった。

図 4-8. (b, c) から、本モデルによって計算された火災前線の通過範囲は調査報告に比べて大きくなり、延焼火災に巻き込まれた地域は過大に評価される結果となった。この主要な要因として、次のことが挙げられる：(1) 大火時に降っていた雨が火災の燃焼や隣接建物への拡大に及ぼす影響を考慮していないこと；(2) 大火時には公設消防によって大規模な消火活動が行われたが、その効果を考慮していないこと；(3) 計算を行うにあたって設定した開口部の条件の信頼性に限界があること；(4) 建物の構造形式を堅牢と非堅牢の 2 種類のみ分類していること。特に、風横方向の延焼範囲に大きな違いが見られるのは、公設消防による消火活動が専ら風横方向から行われたことに関連しているものと考えられる。

(3) 飛び火の発生数と延焼速度

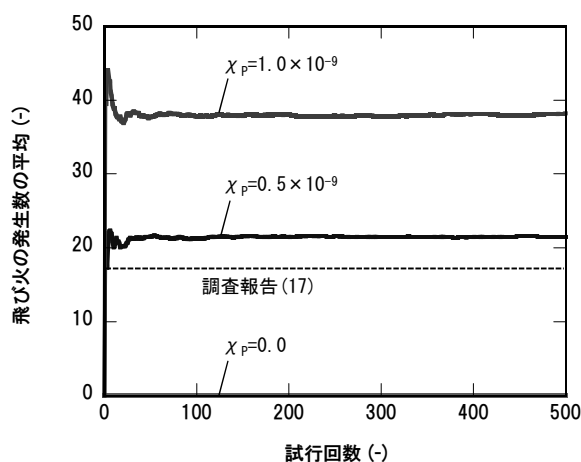
当該市街地における巨視的な延焼速度を考察するにあたっては、図 4-6 に示すように、当時の風向きとほぼ垂直に走る主要な通りに沿って三本の判定線を設定し、火災前線がそれぞれの判定線を初めて通過する時間を評価することとした。なお、飛び火によって判定線が飛び越えられた場合は、その発生時間を通過時間とした。

図 4-9. (a) はモンテカルロ・シミュレーションによって計算された飛び火の発生数の平均値の推移を、図 4-9. (b) は火災前線が判定線 (B) を初めて通過した時間（出火からの経過時間）の平均値の推移を示したものである。それぞれの平均値は、試行回数が増加するにつれて変動が小さくなり、最終的にはほぼ一定値に収束したことが分かる。このことから、本稿におけるモンテカルロ・シミュレーションの試行回数は、モデルの妥当性を考察する上で十分な回数であると考えられる。

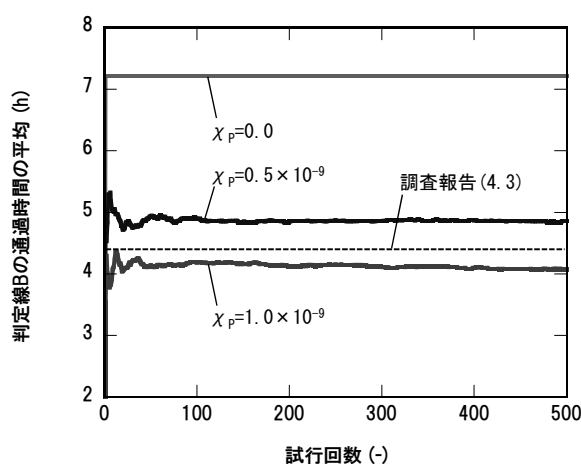
飛び火の発生数の最終的な平均値は、 $\chi_p = 0.0$ の場合（飛び火が発生しない場合）で 0 件、 $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}$ の場合で 21.5 件、 $\chi_p = 1.0 \times 10^{-9}$ の場合で 38.2 件と計算され、定数 χ_p が大きくなるほど飛び火の発生数も増加する結果となった。なお、被災調査によって報告されている飛び火の発生数は 17 件であり、 $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}$ の場合に最も良く一致した。一方、火災前線が判定線 (B) を初めて通過した時間の最終的な平均値は、定数 $\chi_p = 0.0$ の場合（飛び火が発生しない場合）で出火から 7 時間 13 分後、 $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}$ の場合で出火から 4 時間 51

分後、 $\chi_p = 1.0 \times 10^{-9}$ の場合で出火から 4 時間 05 分後と計算され、飛び火の発生数が大きくなるほど火災前線の通過時間が早まる結果となった。なお、調査報告から推定される大火時の通過時間は、出火から約 4 時間 20 分後である。

図 4-10 は、 $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}$ 、 1.0×10^{-9} のそれぞれの場合に計算された飛び火の発生数の相対度数分布を示したものである。これによると、 $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}$ の場合は 20~25 を峰として、 $\chi_p = 1.0 \times 10^{-9}$ の場合は 35~40 を峰として、それぞれの周辺には左側に偏った分布が形成されている。調査報告の値は、 $\chi_p = 1.0 \times 10^{-9}$ の分布の外側にあるものの、 $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}$ の分布の範囲内に収まり、その位置は峰の左側にあることが分かる。このことから、本モデルは飛び火の発生数を調査報告による値と比較して、幾分多めに予測する傾向にあるものと考えられる。なお、標準偏差は $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}$ の場合で 4.28 件、 $\chi_p = 1.0 \times 10^{-9}$ の場合で 5.71



(a) 飛び火の発生数



(b) 判定線 B の通過時間

図 4-9 モンテカルロ・シミュレーションによる平均値の推移

件と推定された（表 4-3）。

図 4-11 は、 $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}, 1.0 \times 10^{-9}$ のそれぞれの場合に計算された火災前線の通過時間の相対度数分布を示したものである。火災前線が判定線（A，B）を通過した時間は、基本的にある範囲を峰として、その周辺には左右どちらかに偏った分布が形成されている。一方で、火災前線が判定線（C）を通過した時間の分布は、峰の左右に大きな偏りは見られず、概ね左右対称の分布となった。 $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}$ の計算結果を見ると、分布の範囲は判定線（A）で 0～4.5h（標準偏差 0.8h），判定線（B）で 1.5～7h（標準偏差 0.97h），判定線（C）で 3～10h（標準偏差 1.13h）と、判定線の位置が出火点から遠ざかるほど通過時間は大きくばらつく結果となった（表 4-3）。なお、大火時の火災前線がそれぞれの判定線を通過した時間は、 $\chi_p = 0.5 \times 10^{-9}, 1.0 \times 10^{-9}$ の両条件ともに、分布の範囲内に収まる結果となった。

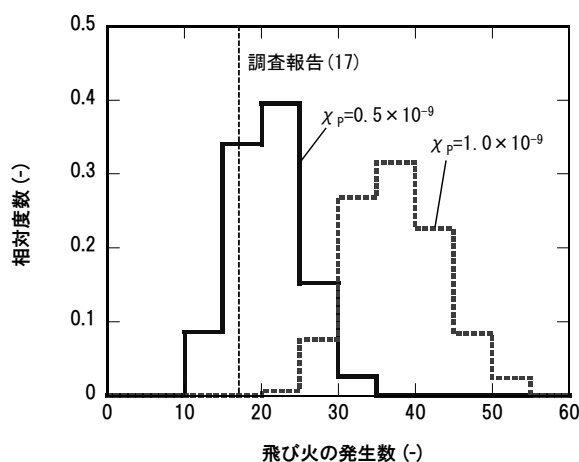
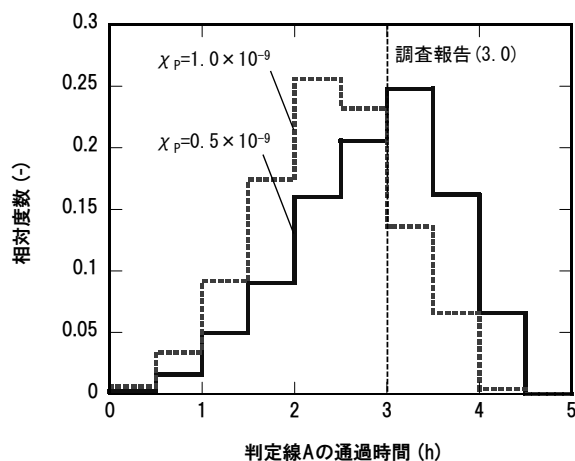
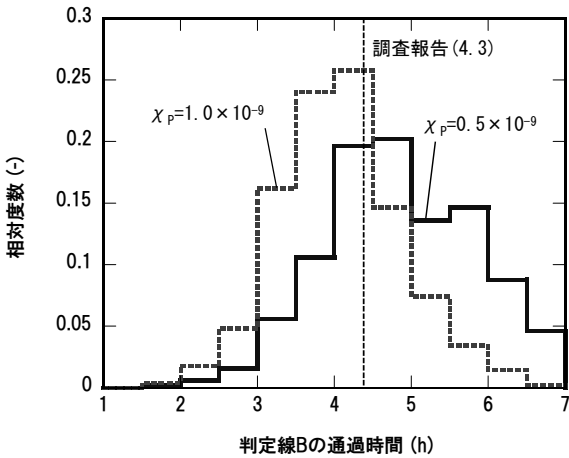


図 4-10 飛び火の発生数（相対度数分布）

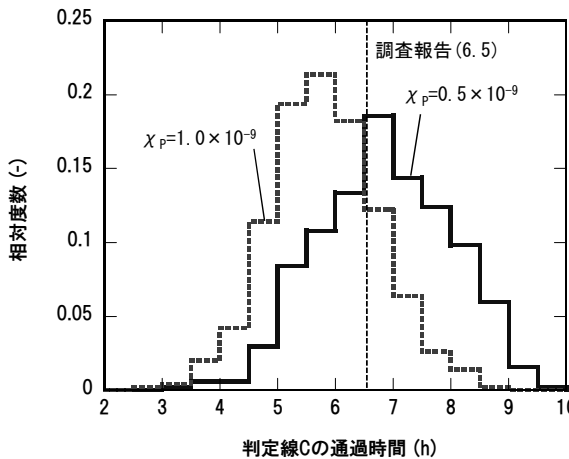


(a) 判定線 A の通過時間

図 4-11 火災前線の通過時間（相対度数分布）



(b) 判定線 B の通過時間



(c) 判定線 C の通過時間

図 4-11 火災前線の通過時間（相対度数分布）

表 4-3 比較指標の平均と標準偏差

比較指標	飛び火の発生数 (-)		判定線Aの通過時間 (h)		判定線Bの通過時間 (h)		判定線Cの通過時間 (h)	
	0.5×10^{-9}	1.0×10^{-9}	0.5×10^{-9}	1.0×10^{-9}	0.5×10^{-9}	1.0×10^{-9}	0.5×10^{-9}	1.0×10^{-9}
平均	21.5	38.2	2.85	2.37	4.85	4.08	6.87	5.82
標準偏差	4.28	5.71	0.80	0.74	0.97	0.80	1.13	0.94
調査報告	17		3.0		4.3		6.5	

4.4 まとめ

本章では、第3章の延焼モデル開発で考慮できなかった火の粉による延焼の発生について、確率論的なモデルを採用し飛び火発生確率 $P_{o,j}$ の定式化を行った。まず、燃焼建物から放出される一つの火の粉 i によって、ある風下側建物 j へ延焼が起こる確率 $p_{o,ij}$ を考えた後、燃焼領域から発生する複数の火の粉の影響下での延焼確率を考えることで、飛び火発生確率 $P_{o,j}$ へと拡張した。

ここでは、一つの火の粉に着目した場合の飛び火シナリオを、

- (A) 燃焼建物からの火の粉の放出
- (B) 風下側建物への火の粉の飛散
- (C) 火の粉の落下位置における可燃物の状況
- (D) 火の粉の持つ潜在的な危険性
- (E) 周辺住民による火の粉の消火活動

の五つの要素で構成し、一つの火の粉による延焼の発生を、(1) 火の粉が建物に飛来し、(2) 火の粉の落下位置に可燃物が存在し、(3) 火の粉が可燃物の着火を引き起こす危険性を潜在的に有しており、(4) 火の粉が周辺住民によって消火されない、という過程によって表わした。これを燃焼領域から発生する複数の火の粉へと拡張した結果、飛び火発生確率 $P_{o,j}$ が次の式で表わされることが分かった。

$$P_{o,j} \approx 1 - \prod_{k=1}^m [1 - n_{B,k} \cdot p_{S,ij} \cdot p_{C,ij} \cdot p_{D,ij} \cdot (1 - p_{F,ij})] \quad (4-22)$$

このうち、火の粉の発生数 $n_{B,k}$ は燃焼建物 k の発熱速度の累積値に比例するものとし、火の粉が飛来する確率 $p_{S,ij}$ は風向方向を対数正規分布、風向に直角な方向を正規分布で近似した飛散確率の積で表わされるものと考えた。また、可燃物の存在確率 $p_{C,ij}$ および火の粉が着火の危険性を有している確率 $p_{D,ij}$ は、これらに関する知見が乏しいことから一定値をとるものとみなした。最後に、火の粉が周辺住民によって消火される確率 $p_{F,ij}$ は住民の滞在確率に比例するものとみなし、その確率を火災からの影響に起因した避難の開始で表現した。

飛び火モデルの検証にあたっては、第3章で開発した延焼性状予測モデルに組み込むことで酒田市大火に適用し、計算結果を延焼状況に関する当時の調査報告と比較した。なお、計算結果の把握にはモンテカルロ・シミュレーションを利用し、調査報告との比較が可能な飛び火の発生数や延焼速度といった巨視的な指標について考察した。これによると、市街地全体での飛び火の発生数の平均は、未知パラメータ χ_p を調整した場合に当時の調査報告と概ね一致する結果が得られた。ただし、酒田市大火で実際に発生した飛び火の全てが当時の調査によって確認されたとは考えにくいことから、本章で開発した飛び火モデルは市街地火災時に発生する飛び火のうち最小限の数を予測するものと言える。

一方で、飛び火モデルの微視的な予測精度については、十分な検証を行うことができなかった。また、モデル化にあたっては、火の粉の落下地点に可燃物が存在する確率 $p_{C,ij}$ を一定値と仮定したため、建物の構造種別による着火の危険性の違いを考慮することができな

かった。今後は、こういったモデル細部の改良を進めるとともに、その他の市街地火災事例に適用することで、更なるモデル検証を行う予定である。

参考文献

- [1] 樋本圭佑・田中哮義: 都市火災の物理的延焼性状予測モデルの開発, 日本建築学会環境系論文集, No.607, pp.15-22, 2006.9
- [2] 大宮喜文・岩見達也: 建物火災に伴う火の粉の飛散と飛び火に関する実態調査, 日本建築学会技術報告集, No.9, pp.133-136, 1999.12
- [3] 鍵屋浩司・岩見達也: 稚内中央地区火災の延焼拡大要因に関する検討, 平成 15 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.372-375, 2003.5
- [4] 吉岡英樹・林吉彦・大宮喜文・菅原進一・野口貴文・加藤信介・大岡龍三: 有風下における火災家屋からの火の粉の発生性状に関する実スケール火災風洞実験, 平成 15 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.376-379, 2003.5
- [5] 吉岡英樹・林吉彦・野口貴文・菅原進一・大岡龍三: 市街地火災時の火の粉の飛散に関する数値シミュレーション, 日本建築学会環境系論文集, No.590, pp.9-16, 2005.4
- [6] 黄弘・大岡龍三・加藤信介・大竹宏・林吉彦: 市街地火災における火の粉の飛散の CFD 解析, 日本建築学会環境系論文集, No.593, pp.1-8, 2005.7
- [7] K.Himoto, and T.Tanaka: Transport of Disk-shaped Firebrand in A Turbulent Boundary Layer, Proc.8th IAFSS Symp., pp.433-444, 2005.9
- [8] S.Kortas, P.Mindykowski, J.L.Consalvi, H.Mhiri, and B.Porterie: Experimental Validation of a Numerical Model for the Transport of Firebrands, Fire Safety Journal, Vol.44, No.8, pp.1095-1102, 2009
- [9] S.L.Manzello, Y.Hayashi, T.Yoneki and Y.Yamamoto: Quantifying the Vulnerabilities of Ceramic Tile Roofing Assemblies to Ignition During a Firebrand Attack, Fire Safety Journal, Vol. 45, No.1, pp.35-43, 2010
- [10] N.Sardoy, J.Consalvi, B.Porterie and A.C.Fernandez-Pello: Modeling Transport and Combustion of Firebrands from Burning Trees, Combustion and Flame, Vol.150, No.3, pp.151-169, 2007
- [11] N.Sardoy, J.L.Consalvi, A.Kaiss, A.C.Fernandez-Pello and B.Porterie: Numerical Study of Ground-level Distribution of Firebrands Generated by Line Fires, Combustion and Flame, Vol.154, No.3, pp.478-488, 2008
- [12] 糸井川栄一・塚越功: 飛火を考慮した市街地火災の確率的延焼モデル, 第 23 回日本都市計画学会学術研究論文集, pp.469-474, 1988
- [13] 浜田稔: 火災の延焼速度について, 火災の研究I, 1951
- [14] 自治省消防庁消防研究所: 酒田市大火の延焼状況等に関する調査報告書, 1977.10
- [15] 塚越功: 酒田市大火の避難行動の解析, 昭和 50 年度秋季講演会梗概集, 建設省建築研究所, pp.79-103, 1977
- [16] 酒田市: 酒田市大火の記録と復興への道, 1978.3
- [17] 長谷見雄二・重川希志依: 火災時における人間の耐放射限界について, 日本火災学会論文集, Vol.31, No.1, pp.7-14, 1981.6

[18] 東京消防庁: 消防科学研究所報 31 号, pp.131-136, 1994

[19] 日本建築学会編: 建築設計資料集成 1 環境, 丸善, p.119, 1978.6

第 5 章

地震火災時における住民の避難先選択のモデル化

5.1 はじめに

第 2 章で定式化を行った避難性状予測モデルでは，ポテンシャル（危険度）の高い地点から低い地点に向かって避難が行われるものと考えることで，避難者の移動メカニズムを危険度によって明示的にモデル化している．このため，各種安全対策の実施効果を定量的に評価することが可能になるものと期待される．

対策効果の評価値が合理的な値であるかは，避難モデルそのものの予測精度に大きく依存するが，この予測精度を左右する一つの要因として，地震火災時に住民がどこを目指して避難するかという問題が挙げられる．1923 年に発生した関東大震災では，数十万人もの避難者が上野公園や皇居前広場といったいくつかの広大な空き地に集結したことが報告されている[1,2]．このことは，市街地に分布するオープンスペースの間で，避難空間として潜在的に避難者を引き付ける程度（以降では，魅力度と呼ぶ）に差がある可能性を示しており，地震火災時の住民避難性状を精度良く予測するには，こういった避難場所の魅力度の偏りによる影響を避難性状予測モデルに組み込む必要がある．

地震火災時における住民の避難先については，これまでもいくつかの研究がなされており，それらは過去の避難事例に関する残存資料を分析したもの[3]，および，アンケート調査から住民の意識を把握したもの[4,5]に分類される．これらの研究の共通の特徴は，個々の被験者単位で得られたデータを集計することで，対象地域の住民の避難先やその決定要因に関する基礎資料を提示している点にある．しかし，避難場所の魅力度に起因した避難先の決定構造については十分な検討がなされておらず，提示された資料が避難モデルを用いた予測計算には利用できないという問題があった．このことから，避難場所の魅力度を考慮して住民の避難先を予測可能な手法の開発が必要である．

そこで本章では，京都市住民に対して新たにヒアリング調査を実施することで，京都市広域避難場所の魅力度を考慮した住民の避難先選択のモデル化を行うことを目的とする．まず，京都市の一部の地域で実施したヒアリング調査の内容について整理し，避難先選択

を支配する要因を把握する．次に，その支配要因に基づいて避難先選択モデルの定式化を行い，それを調査から得られたデータを用いて検証する．最後に，定式化したモデルを京都市全域へと拡張することで，広域避難場所の流入避難者数を推定し考察を加える．

5.2 京都市住民に対するヒアリング調査

表 5-1 は，京都市地域防災計画の中で指定されている広域避難場所の一覧を，図 5-1 は，その配置（□印）を示したものである．なお，表 5-1 における広域避難場所の敷地面積は，京都市の地形図（1/25000 縮尺）から読み取った推定値であり，広域避難場所の収容可能人員は，避難者一人あたりに必要な面積を 2.0m^2 とした場合に安全面積から計算される値である[6]．京都市では，67 か所の広域避難場所が指定されており，それらは延焼火災からの輻射熱に対して 1ha 以上の安全面積を担保している[6]．中でも，京都御苑や二条城，金閣寺，仁和寺といった歴史的価値を有する空間が広域避難場所として指定されていることが特徴的である．京都市における広域避難場所は，基本的に建物の密集する市街地の内部には少なく，多くは河川や山麓に沿って分布している．

5.2.1 調査の概要

表 5-2 は，調査の概要を示したものである．調査は 2009 年 9 月 1 日から 11 月 30 日までの昼間に，京都市の街頭でヒアリング形式により実施した．ヒアリングを実施した調査地

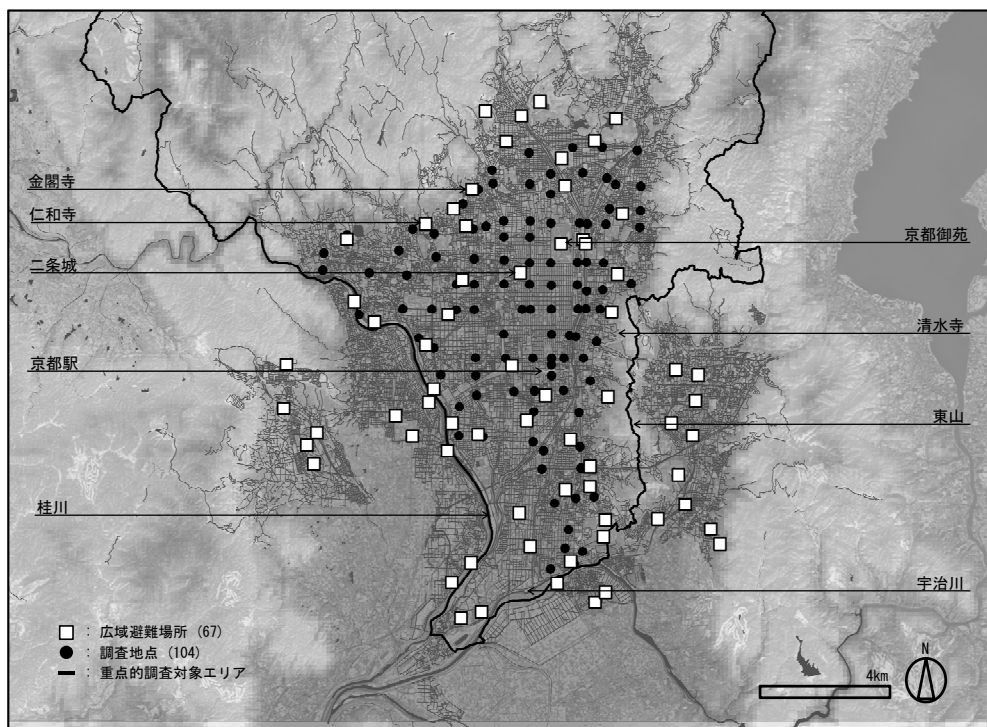


図 5-1 京都市の広域避難場所と調査地点

表 5-1 京都市の広域避難場所の一覧[6]

No.	行政区	広域避難場所名称	分類	敷地面積 (ha)	安全面積 (ha)	収容可能人員 (-)
1	北区	京都ゴルフ場舟山コース(西賀茂)	その他	40.0	39.0	195,000
2		大宮交通公園	公園	2.0	1.2	6,000
3		金閣寺境内	歴史的空間	17.5	1.0	5,000
4		立命館大学衣笠グラウンド	学校	10.0	1.8	9,000
5		洛星高校グラウンド	学校	1.5	1.5	7,500
6	上京区	京都ゴルフ場上賀茂コース	その他	55.6	39.0	195,000
7		京都御苑	歴史的空間	87.0	34.7	173,500
8	左京区	府立植物園・府立大学グラウンド	その他	31.2	28.0	140,000
9		宝が池公園	公園	30.0	14.0	70,000
10		京都大学北部構内農学部グラウンド	学校	11.8	4.3	21,500
11		岡崎公園	公園	4.5	4.5	22,500
12	中京区	宝が池公園スポーツ広場	公園	7.0	5.6	28,200
13		二条城	歴史的空間	21.8	7.0	35,000
14		島津製作所三条工場北グラウンド	その他	20.5	2.8	13,750
15	東山区	日吉ヶ丘高校グラウンド・月輪中学校グラウンド・泉涌寺境内	学校	12.5	4.7	23,500
16	下京区	梅小路公園	公園	22.7	10.0	50,000
17	南区	殿田公園・陶化中学校グラウンド	公園	3.5	1.7	8,250
18		上鳥羽公園(グラウンド)	公園	1.7	1.7	8,500
19		吉祥院公園(グラウンド)・桂川左岸久世橋上流	公園	9.9	7.8	39,000
20		塔南高校グラウンド	学校	1.4	1.0	5,000
21		陸上自衛隊桂駐とん地	その他	37.4	1.0	5,000
22		久世橋西詰公園	公園	3.1	3.1	15,500
23		仁和寺境内	歴史的空間	14.0	1.3	6,500
24	右京区	西京極総合運動公園	公園	15.0	7.2	36,000
25		西院公園・デルタ自動車四条教習所	公園	2.6	2.3	11,250
26		広沢の池付近・仏教大学グラウンド・堀川高校グラウンド	学校	18.0	18.0	90,000
27	伏見区	京都警察学校グラウンド・龍谷大学構内	学校	12.4	3.0	15,000
28		京都教育大学附属高校・消防学校グラウンド	学校	11.3	5.4	27,000
29		京都教育大学構内	学校	11.0	5.3	26,250
30		桃山御陵・伏見桃山城運動公園	その他	76.0	21.7	108,500
31		伏見公園(グラウンド)	公園	2.0	1.9	9,500
32		下鳥羽公園	公園	2.0	1.9	9,500
33		三栖公園	公園	2.2	2.2	11,000
34		小栗栖中学校グラウンド・小栗栖小学校グラウンド	学校	3.5	1.3	6,400
35		栗陵中学校グラウンド・池田小学校グラウンド	学校	3.2	1.1	5,600
36		春日丘中学校グラウンド・日野小学校グラウンド	学校	3.2	1.3	6,250
37		日野野外活動施設	その他	1.6	1.6	7,850
38		向島南小学校グラウンド・宇治川公園	学校	8.7	5.6	27,950
39		向島中学校グラウンド・向島二の丸小学校グラウンド	学校	7.0	2.1	10,450
40		向島藤の木小学校グラウンド・向島公園	学校	5.0	4.9	24,350
41		伏見北堀公園	公園	5.4	3.7	18,650
42		羽東師運動広場	公園	10.4	2.8	13,850
43		京都府警察自動車運転免許試験場	その他	8.9	5.5	27,550
44		横大路運動公園	公園	13.0	12.8	64,000
45		京都競馬場(駐車場)	その他	18.0	12.1	60,500
46	山科区	聖母女学院短期大学・深草中学校グラウンド	学校	9.9	1.5	7,500
47		山科中央公園・安祥寺中学校グラウンド・山階小学校グラウンド	公園	4.0	2.0	10,050
48		東山中・高等学校グラウンド	学校	3.0	1.3	6,650
49		東野公園・山科中学校グラウンド	公園	6.3	3.9	19,400
50		洛東自動車教習所	その他	1.7	1.6	8,100
51		龍谷大学グラウンド	学校	6.0	5.4	26,800
52		勤修寺公園・勤修中学校グラウンド	公園	4.4	3.8	19,000
53	西京区	桂高等学校グラウンド	学校	5.4	1.8	9,000
54		桂川中学校グラウンド・川岡東小学校グラウンド・牛ヶ瀬公園	学校	4.8	2.4	11,950
55		小畑川中央公園	公園	9.0	9.0	44,850
56		境谷小学校グラウンド・洛西中学校グラウンド・境谷公園	学校	6.0	2.6	13,000
57		竹の里小学校グラウンド・大蛇ヶ池公園	学校	7.3	2.2	11,150
58		桂坂小学校グラウンド・大枝中学校グラウンド・国際日本文化研究センター	学校	5.9	5.8	29,000
59		市立芸術大学	学校	7.2	3.4	17,100
60	—	賀茂川右岸(御園橋より上流)	河川	2.3	2.3	11,250
61	—	賀茂川右岸(上賀茂橋～菱橋)	河川	5.6	4.0	20,000
62	—	鴨川右岸(賀茂大橋～丸太町橋)	河川	3.1	3.1	15,500
63	—	鴨川左岸(賀茂大橋～丸太町橋)	河川	3.2	2.7	13,500
64	—	円山公園(将軍塚周域)	公園	13.0	7.9	39,300
65	—	桂川左岸(桂大橋～東海道線)	河川	8.0	8.0	40,000
66	—	桂川左岸(松尾橋～上野橋)	河川	7.0	6.3	31,500
67	—	桂川右岸(嵐山公園～松尾橋～上野橋)	河川	15.5	13.7	68,500

※ 広域避難場所の分類は、「学校」・「公園」・「河川」・「歴史的空間」の4つに分類し、これらに当てはまらないものは、「その他」とした。

点の数は104か所であり、その配置は図5-1の●印に相当する。ただし、東山・宇治川・桂川に囲まれた地域に位置する広域避難場所の魅力度を重点的に把握するため、その地域内の人通りの多い大通りの交差点を基本として、調査地点間の間隔が概ね500mになるように設定した。それぞれの調査地点では、被験者の性別や年齢が偏らないように、通行者を[男性・女性]、および、[青年・壮年・老年]の六つに分類し、各分類あたり5人を目安にして被験者を選別した。なお本調査では、18歳未満および外国人は対象としていない。結果としてヒアリング調査に回答した被験者は2,939人であり、そのうち住民の被験者は2,267人であった。図5-2は、ヒアリング調査に回答した京都市住民の性別・年齢別の内訳を示したものである。図から、66歳以上の高齢者の回答が多いことが分かる。なお、各調査地点での住民の被験者数は10～33人の範囲で、その平均値は21.8人となった。特に、観光地や商業地に近い調査地点では、観光や仕事で市内を訪問した人の占める割合が大きく、住民の被験者数が少なくなる結果となった。

表5-2 調査の概要

調査形式	ヒアリング調査			
調査期間	2009.9.1～2009.11.30（昼間）			
調査地点数	104（京都市街頭）			
被験者数	2,939 ※ 住民：2,267 観光客：271 その他：401			
被験者（住民）の内訳	年齢	男性	女性	合計
	18～25	198	201	399
	26～35	159	172	331
	36～45	133	164	297
	46～55	110	141	251
	56～65	186	185	371
	66～	302	316	618
調査地点の被験者数	10～33（平均：21.8） ※ [男性・女性]、[若年・壮年・老年]の6分類			

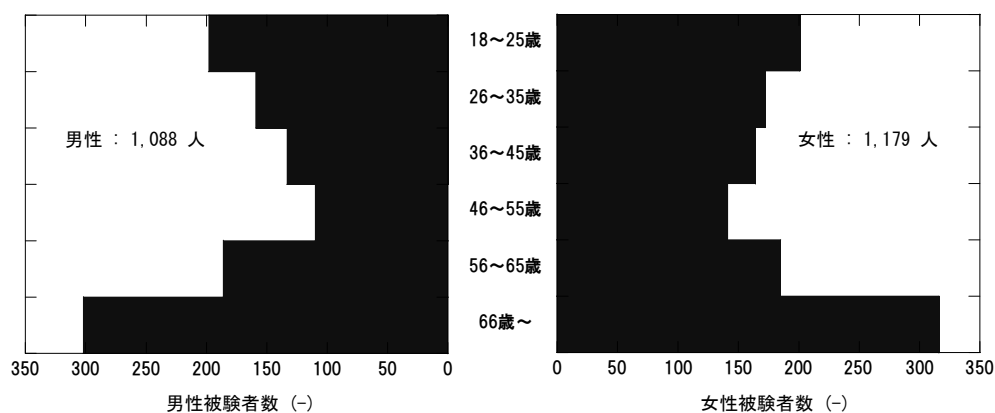


図5-2 被験住民の内訳

5.2.2 調査の質問内容

図 5-3 は、ヒアリング調査における口頭質問の手順とその内容を示したものである。口頭質問の内容は大きく二つに分類される：

(Ⅰ) 地震火災時の避難先に関する質問

(Ⅱ) 被験者の属性に関する質問

このうち、地震火災時の避難先に関する質問は、避難先となる避難場所の名称、徒歩による所要時間、避難先の方角、避難先の選択理由の四つである。一方、被験者の属性に関する質問は、年齢、京都市での在住期間、住所の三つである。

まず、全ての被験者の地震火災に対するイメージを統一するため、阪神淡路大震災における延焼火災の様子が写された二枚の写真（図 5-4）を見せ、市街地で大規模な延焼火災が発生するとともに調査地点周辺の建物が盛んに燃焼している状況を想像させた。次に、延焼火災からの避難のため調査地点から避難場所へ移動することを想定し、避難先となる場所の名称（名称が分からない場合には避難先に関する地理的な情報）を回答させた。さらに、回答された場所へは何らかの理由で避難できないことを仮定し、その他の避難先となる場所の名称を回答させた。なお、避難先を回答させる際には、避難場所に関する資料は示していない。これらの避難先についての質問は、被験者が回答できなくなった時点、もしくは、回答を 5 回繰り返した時点で終了し、個々の回答ごとに避難先までの徒歩による所要時間、調査地点からの方角、避難先を選択した理由を併せて質問した。このうち、避難先の選択理由については、筆者らが予め用意した 14 個の選択理由の中から複数を可として選択させた。

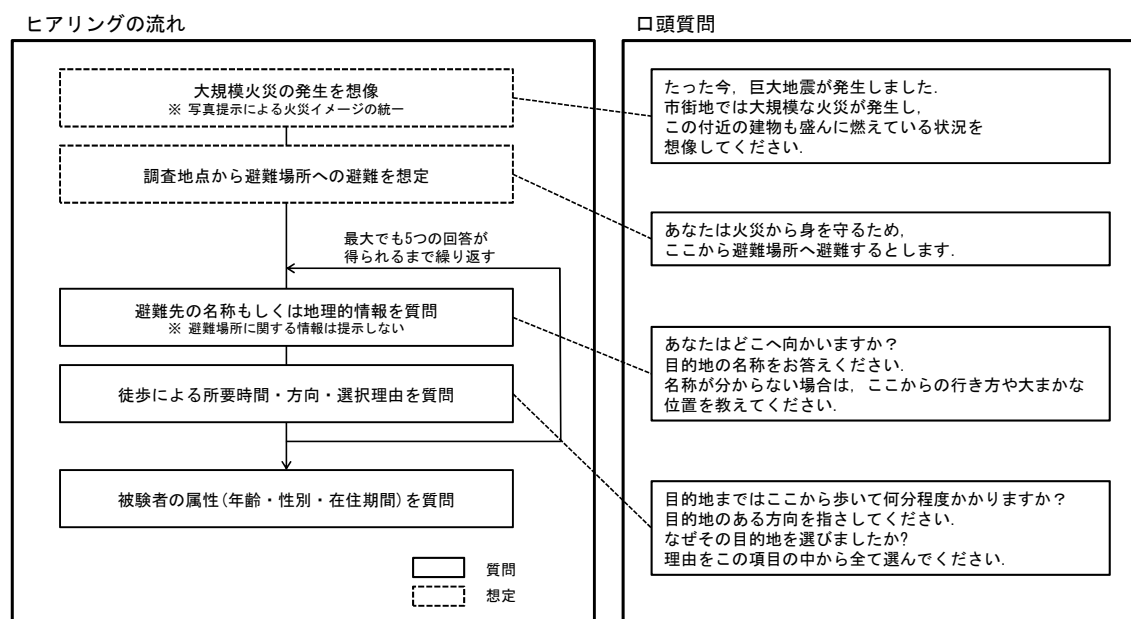


図 5-3 口頭質問の手順とその内容



図 5-4 提示写真[7,8]

5.2.3 調査結果とその考察

ここでは、調査によって得られた京都市住民の広域避難場所に関する回答を整理し、避難先選択を支配する要因を把握する。ただし、被験者が広域避難場所の名称を正確に回答した場合でも、広域避難場所までの所要時間、もしくは、その方角に大きな誤りがある場合には、その避難場所を認識していないものとみなした。

(1) 在住期間の寄与度

表 5-3 は、調査によって得られた回答を被験者の京都市における在住期間、および、被験者が名前を挙げた広域避難場所の数ごとに分類したものである。なお被験者の在住期間は、(1) 1 年以内、(2) 1 から 5 年以内、(3) 5 から 10 年以内、(4) 10 から 20 年以内、(5) 20 から 40 年以内、(6) 40 年より長い、の六つに分類し、括弧付きの数値は各項目の被験者数を在住期間ごとの総被験者数（最右列）で除した値に相当する。調査結果から、広域避難場所を一つも回答できなかった被験者は 1,209 人であり、京都市住民の総被験者数 2,267 人のおよそ 53%に相当する。一方で、少なくとも一つの広域避難場所を回答した被験者は

表 5-3 在住期間による回答の内訳

在住期間	広域避難場所の回答数					合計
	0	1	2	3	4～	
1年以内	123 (0.62)	61 (0.31)	13 (0.07)	0 (0.00)	0 (0.00)	197 (1.00)
1～5年以内	248 (0.63)	122 (0.31)	17 (0.04)	6 (0.02)	1 (0.00)	394 (1.00)
5～10年以内	116 (0.54)	77 (0.36)	20 (0.09)	2 (0.01)	0 (0.00)	215 (1.00)
10～20年以内	149 (0.56)	99 (0.37)	16 (0.06)	2 (0.01)	0 (0.00)	266 (1.00)
20～40年以内	258 (0.51)	210 (0.41)	40 (0.08)	1 (0.00)	0 (0.00)	509 (1.00)
40年より長い	315 (0.46)	290 (0.42)	68 (0.10)	13 (0.02)	0 (0.00)	686 (1.00)
合計	1209 (0.53)	859 (0.38)	174 (0.08)	24 (0.01)	1 (0.00)	2267 (1.00)

1,058 人であり、このうちの殆どは広域避難場所を一つしか回答できない結果となった。広域避難場所を一つも回答できなかった被験者の割合は、在住期間が 1 年以内および 1 から 5 年以内で最も大きく、在住期間が増加するにつれて概ね減少していることが分かる。これと同義的に、広域避難場所を一つだけ回答した被験者の割合も在住期間の増加に伴って増加している。しかし、こうした在住期間の大小が回答の可否に与える影響は微小であると言える。なお、広域避難場所を二つ以上回答した被験者とその在住期間については、標本サイズが小さいこともあって相関が見られない結果となった。

(2) 避難圏域の非対称性

図 5-5 は、回答数の多かった上位 10 か所の広域避難場所について、その回答数を整理したものである。回答数の最も多かった広域避難場所は京都御苑であり、次いで二条城、梅小路公園、京都大学農学部グラウンド、鴨川の順に続いた。ここでは、最も回答数の多かった京都御苑に着目し、その避難圏域の広がりについて考察する。

図 5-6 は、京都御苑の名前を挙げた被験者の各調査地点における割合を示したものである。ここでは、○印の大きさがその割合に相当する。京都御苑を回答した被験者の割合は避難場所に近い調査地点で大きく、方角によってばらつきがあるものの、基本的には避難場所から遠ざかるにつれて減少していることが分かる。京都御苑の南側と北側には、それぞれ丸太町通り（点線 A）と今出川通り（点線 B）が東西方向に走っているが、図 5-6 には、これら二本の通りに沿った回答被験者の割合についても、折れ線グラフで示してある。これによると、京都御苑の名前を挙げた被験者は、河原町通りと川端通りの間を南北に流れる鴨川（川幅 40m）を基準として西側に偏っており、これを東側に越えた地点では急激に減少していることが分かる。このことは、鴨川が京都市住民の避難先選択に何らかの悪影響を及ぼしている可能性を示唆しており、河川といった地理的な隙間の存在は避難場所の避難圏域に歪みを生じさせる可能性がある。

京都御苑を回答した被験者は、その殆どが避難場所から 2km 以内の範囲に分布しているが、それ以外の遠く離れた調査地点にもいくらか存在していることが分かる。この要因と

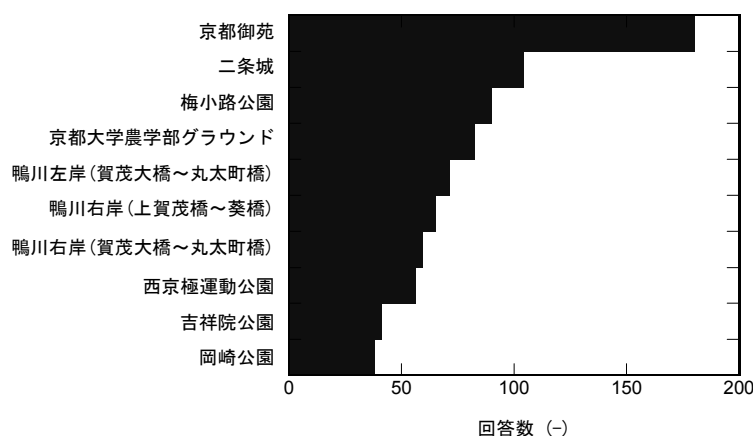


図 5-5 回答数の多かった広域避難場所上位 10 か所

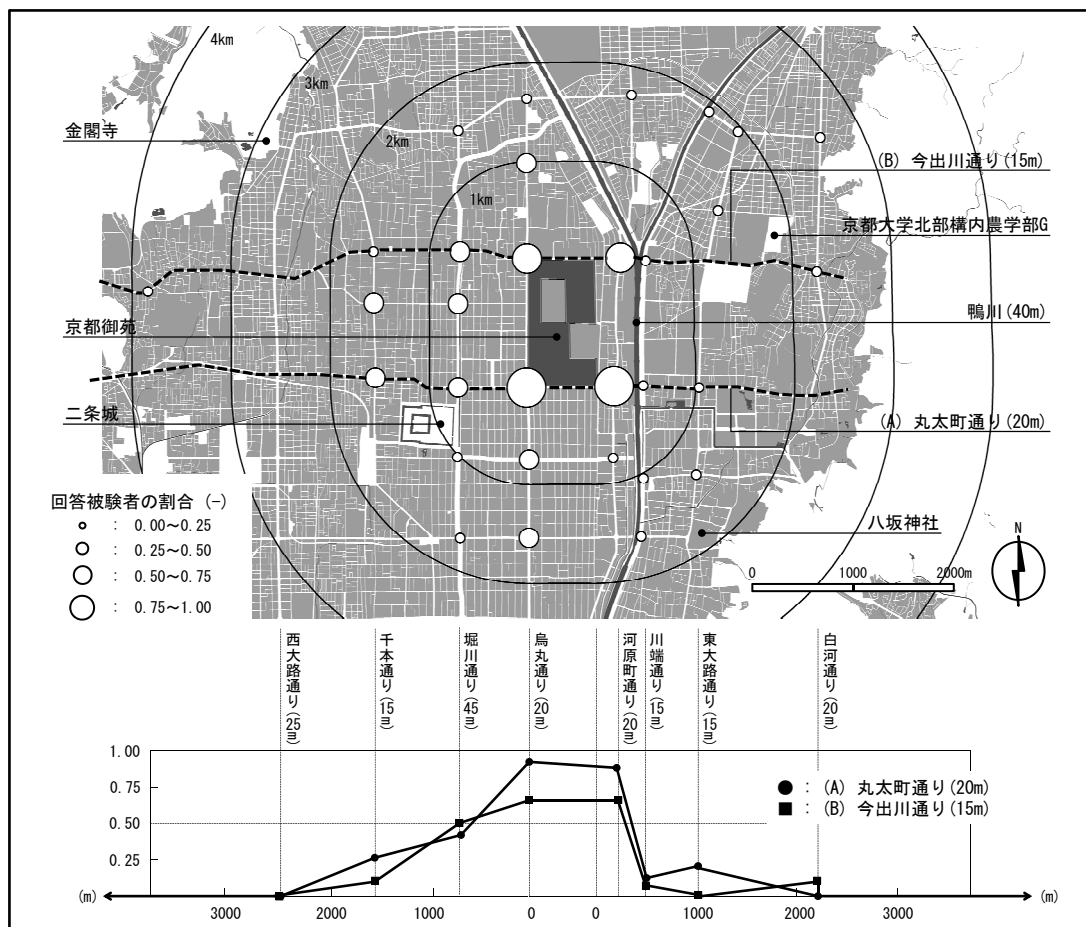


図 5-6 京都御苑の避難圏域

して、次の二つが考えられる: (1) 京都御苑が被験者の生活行動範囲に含まれており、長距離にもかかわらず日常的に良く見知った避難場所へ避難しようと考えた; (2) 京都御苑の避難空間としての影響範囲が極めて広い。

5.3 地震火災時における住民の避難先選択モデル

図 5-7 は、地震火災時における住民の避難先選択モデルの概念を示したものである。ここでは、個々の住民がある広域避難場所を避難先の候補として考える確率 P_R （以降では、広域避難場所の選択確率と呼ぶ）を定義し、避難場所の魅力度を考慮した確率論的な定式化を行う。

5.3.1 選択確率

住民による広域避難場所の選択確率 P_R をモデル化するにあたっては、

(Ⅰ) 広域避難場所が潜在的に有する「魅力度 Φ 」

(Ⅱ) 住民が避難先の候補として考えるための「閾値 Θ 」

の二種類の仮想的な概念量を考え、魅力度 Φ が閾値 Θ を超える場合には、住民がその広域避難場所を避難先の候補として考えるものと仮定する。

$$\Phi \geq \Theta \quad (5-1)$$

ただし、魅力度 Φ および閾値 Θ は確率変数である。本稿で仮定する魅力度 Φ は、避難先の決定構造を数学的に取り扱うための便宜的な概念であり、値が大きいほど避難先の候補として考えられる可能性が高いものとする。ここでは、これを個々の広域避難場所 j に特有の値 Φ_j と考え、次のように表わす。

$$\Phi_j = \bar{\Phi}_j + \Phi'_j \quad (5-2)$$

ただし、 $\bar{\Phi}_j$ は魅力度 Φ_j のうち確率的に変動しない成分（確定項）、 Φ'_j は確率的に変動する成分である。一方の閾値 Θ は、住民 i と広域避難場所 j の関係から説明できるものと考え、次のように表わす。

$$\Theta_{ij} = \bar{\Theta}_{ij} + \Theta'_{ij} \quad (5-3)$$

ただし、 $\bar{\Theta}_{ij}$ は閾値 Θ_{ij} のうち確率的に変動しない成分（確定項）、 Θ'_{ij} は確率的に変動する成分である。本章では、閾値の確定項 $\bar{\Theta}_{ij}$ を調査結果から把握した避難先選択の支配要因をもとに、次のような線形関係で表わす。

$$\bar{\Theta}_{ij} = \alpha_1 \cdot t_i + \alpha_2 \cdot s_{ij} + \alpha_3 \cdot d_{ij} + \alpha_4 \quad (5-4)$$

ただし、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ は定数、 t_i は住民 i の在住期間（年）、 s_{ij} は住民 i と避難場所 j の境界

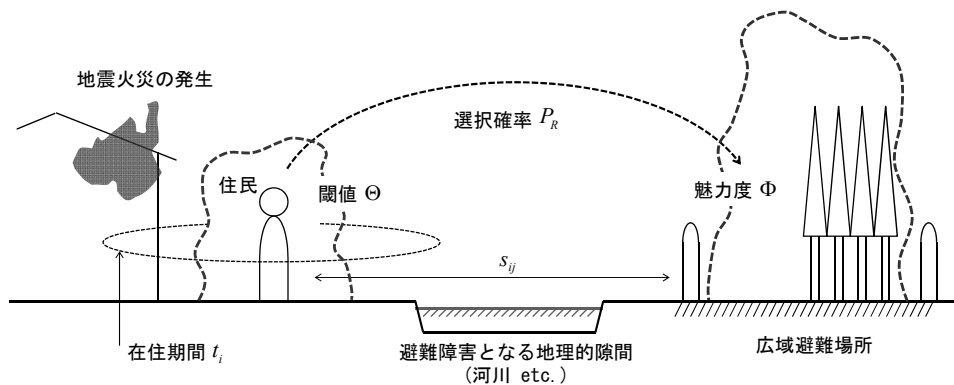


図 5-7 地震火災時における住民の避難先選択モデルの概念図

との直線距離 (m), d_{ij} は住民 i と避難場所 j の間に避難を妨げる地理的な隙間が存在する場合を 1, それ以外の場合を 0 とするダミー変数である.

住民 i による広域避難場所 j の選択確率 P_R は, 式 (5-1) から次のように表わされる.

$$P_R = P(\Phi_j \geq \Theta_{ij}) = P(\Theta'_{ij} - \Phi'_j \leq \bar{\Phi}_j - \bar{\Theta}_{ij}) = F(\bar{\Phi}_j - \bar{\Theta}_{ij}) \quad (5-5)$$

ただし, $P(A)$ は事象 A が生じる確率, F は $\Theta'_{ij} - \Phi'_j$ の累積分布関数である. ここでは, 魅力度と閾値の変動成分 Φ'_j, Θ'_{ij} が互いに独立なガンベル分布に従うものとする. ガンベル分布に従う確率変数 X の累積分布関数 $F(x)$ は次のように表わされる.

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right] \quad (5-6)$$

ただし, a, b は定数である. 互いに独立な確率変数 X_1, X_2 がパラメータ $(0,1)$ のガンベル分布に従うとき, $X_2 - X_1$ の累積分布関数は次のように表わされる.

$$P(X_2 - X_1 \leq x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (5-7)$$

この関係をもとに式 (5-5) を書き直せば, 選択確率 P_R は次のように表わされる.

$$P_R = \frac{1}{1 + \exp[-(\bar{\Phi}_j - \bar{\Theta}_{ij})]} \quad (5-8)$$

5.3.2 避難先選択モデルの検証

ここでは, ヒアリング調査から得られたデータを用いて, 式 (5-8) に含まれる未知パラメータの推定を行う. 式 (5-8) に含まれる未知パラメータは,

- (I) 魅力度の確定項 $(\bar{\Phi}_1, \bar{\Phi}_2, \dots, \bar{\Phi}_N)$
- (II) 閾値に関する定数 $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$

であり, 最尤法と回帰モデルを併用することで値の推定を行う. このうち, 最尤法については, 次の支配方程式をニュートン法を用いて解くことで未知パラメータが計算される.

$$\frac{\partial \log L(\beta)}{\partial \beta} = 0 \quad (5-9)$$

ただし, β は未知パラメータ行列, L は尤度関数である. 尤度関数 L はヒアリング調査で観測されたデータが同時に生起する確率に相当し, 次のように表わされる.

$$L = \prod_{i=1}^M \left(\prod_{k=1}^{N_i} (P_k) \prod_{l=1}^{N-N_i} (1-P_l) \right) \quad (5-10)$$

ここに、 $M(=2267)$ は推定に用いる被験者 i の数、 N_i は被験者 i が回答した広域避難場所の数、 N は魅力度 Φ_j の推定対象となる広域避難場所の数である。

ここでは、最尤法を用いて Φ_j を推定する広域避難場所の数 N を五人以上の被験者から回答の得られた31か所とし、それ以外の広域避難場所(36か所)については、最尤法による推定結果から構築される回帰モデルを利用することで Φ_j の値を予測する。その結果、最尤法に用いるサンプル数は70,277となる。なお、避難を妨げる地理的な隙間については、市街地を分断する河川、軌道、山岳のうち40m以上の幅を有するものを設定した。

(1) 魅力度の推定結果

最尤法によって推定された魅力度 Φ_j の値を広域避難場所の分類ごとにプロットしたものが図5-8である。広域避難場所の分類は、(1)公園、(2)学校、(3)河川、(4)歴史的空間、(5)その他、の五つであり、その一覧は表5-1に示してある。なお、魅力度 Φ_j の値は広域

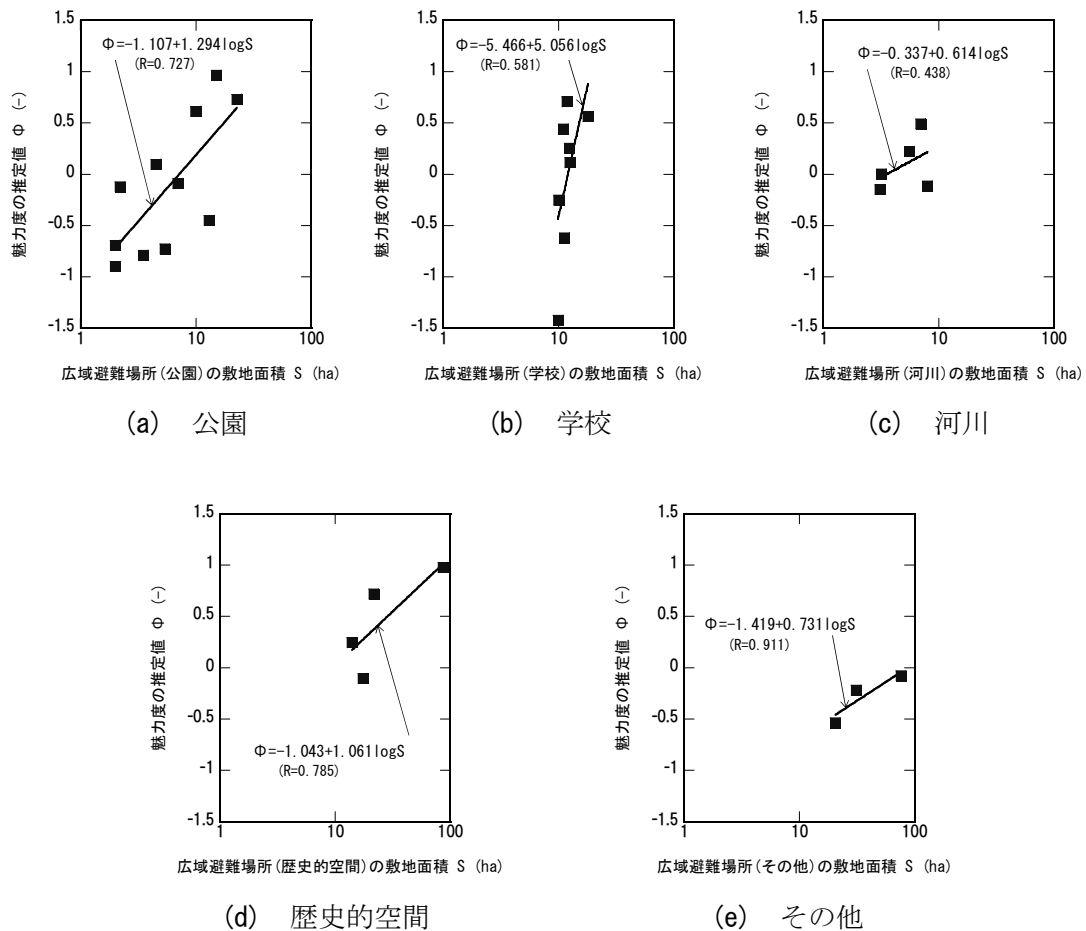


図5-8 最尤法による魅力度の推定結果

避難場所間の相対的な指標であり，値の正負は意味を持たない．広域避難場所の敷地面積を説明変数にとってそれぞれの分類に近似曲線を引けば，次式が得られる．

$$\bar{\Phi}_j = \begin{cases} -1.107 + 1.294 \log(S_j) & (R = 0.727) & \cdots \text{Park} \\ -5.466 + 5.056 \log(S_j) & (R = 0.581) & \cdots \text{School} \\ -0.337 + 0.614 \log(S_j) & (R = 0.438) & \cdots \text{River} \\ -1.043 + 1.061 \log(S_j) & (R = 0.785) & \cdots \text{Historical - space} \\ -1.419 + 0.731 \log(S_j) & (R = 0.911) & \cdots \text{Other} \end{cases} \quad (5-11)$$

ただし， S は広域避難場所の敷地面積 (ha)， R は相関係数である．河川に分類される広域避難場所については，両者の間に相関が見られないものの，基本的には敷地面積の増加に伴って魅力度の値も増加する関係が得られた．

最尤法と回帰モデルによって推定された全広域避難場所の魅力度 $\bar{\Phi}_j$ を一覧として整理したものが表 5-4 である．また，図 5-9 はこれらを可視化したものであり，棒の長さが魅力度の大きさに相当する．魅力度の最も高い広域避難場所は京都御苑と推定され，次いで西京極総合運動公園，宝が池公園，梅小路公園，二条城，京都大学農学部グラウンドの順に続いた．特に，京都御苑や二条城は文化的にも観光的にも重要な京都市の象徴であり，この

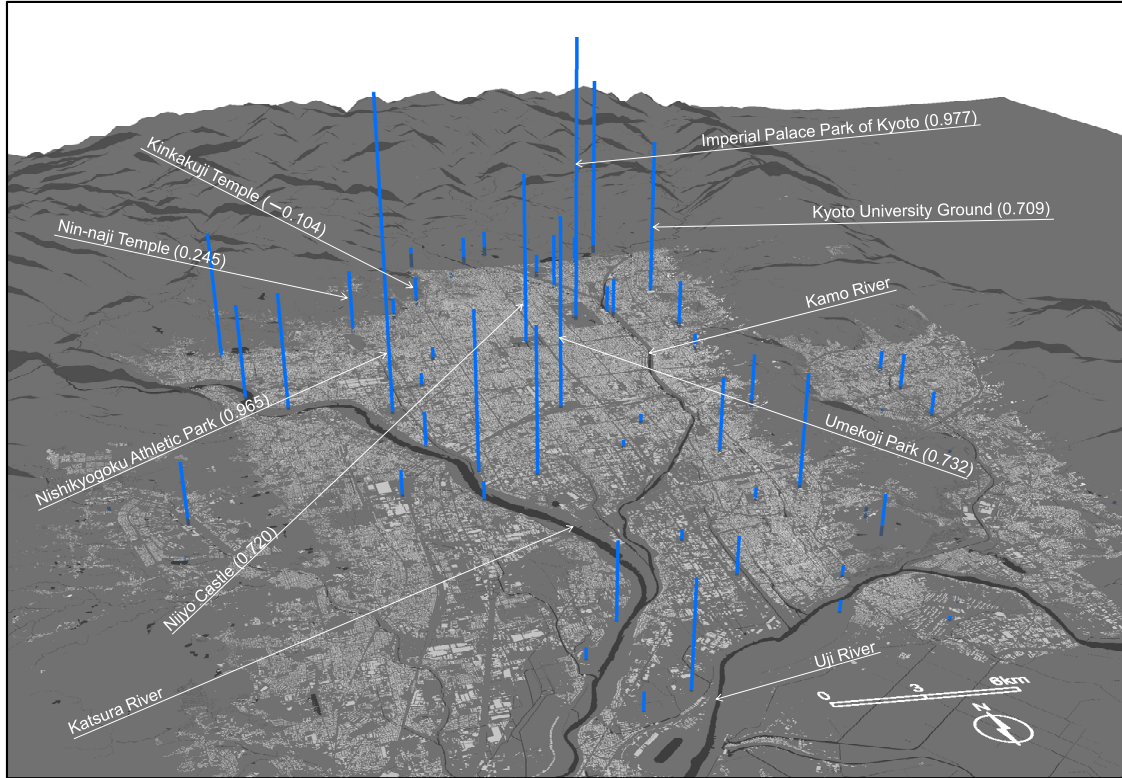


図 5-9 魅力度の分布

表 5-4 魅力度の推定値の一覧

魅力度の推定値 (-)		広域避難場所名称	分類	敷地面積 (ha)
0.5~1.0	0.9772	京都御苑	歴史的空間	87.0
	0.9652	西京極総合運動公園	公園	15.0
	0.8044	宝が池公園	公園	30.0
	0.7324	梅小路公園	公園	22.7
	0.7196	二条城	歴史的空間	21.8
	0.7085	京都大学北部構内農学部グラウンド	学校	11.8
	0.6137	吉祥院公園(グラウンド)・桂川左岸久世橋上流	公園	9.9
	0.5731	塔南高校グラウンド	学校	1.4
	0.5637	広沢の池付近・仏教大学グラウンド・堀川高校グラウンド	学校	18.0
0.0~0.5	0.4936	桂川左岸(松尾橋~上野橋)	河川	7.0
	0.4436	京都教育大学構内	学校	11.0
	0.3939	桂川右岸(嵐山公園~松尾橋~上野橋)	河川	15.5
	0.3344	横大路運動公園	公園	13.0
	0.2527	京都警察学校グラウンド・龍谷大学構内	学校	12.4
	0.2454	仁和寺境内	歴史的空間	14.0
	0.2224	賀茂川右岸(上賀茂橋~菱橋)	河川	5.6
	0.2090	羽東師運動広場	公園	10.4
	0.1278	小畑川中央公園	公園	9.0
	0.1132	日吉ヶ丘高校グラウンド・月輪中学校グラウンド・泉涌寺境内	学校	12.5
	0.0972	岡崎公園	公園	4.5
	0.0060	鴨川左岸(賀茂大橋~丸太町橋)	河川	3.2
	-0.0727	東野公園・山科中学校グラウンド	公園	6.3
-0.5~0.0	-0.0788	桃山御陵・伏見桃山城運動公園	その他	76.0
	-0.0908	宝が池公園スポーツ広場	公園	7.0
	-0.1036	金閣寺境内	歴史的空間	17.5
	-0.1144	桂川左岸(桂大橋~東海道線)	河川	8.0
	-0.1208	賀茂川右岸(御園橋より上流)	河川	2.3
	-0.1208	三橋公園	公園	2.2
	-0.1434	京都ゴルフ場上賀茂コース	その他	55.6
	-0.1489	鴨川右岸(賀茂大橋~丸太町橋)	河川	3.1
	-0.2179	府立植物園・府立大学グラウンド	その他	31.2
	-0.2479	京都ゴルフ場舟山コース(西賀茂)	その他	40.0
	-0.2486	立命館大学衣笠グラウンド	学校	10.0
	-0.2692	陸上自衛隊桂駐とん地	その他	37.4
	-0.2744	勤修寺公園・勤修中学校グラウンド	公園	4.4
	-0.3279	山科中央公園・安祥寺中学校グラウンド・山階小学校グラウンド	公園	4.0
	-0.4497	円山公園(将軍塚周域)	公園	13.0
	-0.4712	久世橋西詰公園	公園	3.1
	-0.5014	京都競馬場(駐車場)	その他	18.0
-1.0~-0.5	-0.5337	島津製作所三条工場北グラウンド	その他	20.5
	-0.5700	西院公園・デルタ自動車四条教習所	公園	2.6
	-0.6150	京都教育大学附属高校・消防学校グラウンド	学校	11.3
	-0.6894	伏見公園(グラウンド)	公園	2.0
	-0.7158	向島南小学校グラウンド・宇治川公園	学校	8.7
	-0.7175	下鳥羽公園	公園	2.0
	-0.7250	京都府警察自動車運転免許試験場	その他	8.9
	-0.7276	伏見北堀公園	公園	5.4
	-0.7872	殿田公園・陶化中学校グラウンド	公園	3.5
	-0.8088	上鳥羽公園(グラウンド)	公園	1.7
	-0.8977	大宮交通公園	公園	2.0
	-1.1010	竹の里小学校グラウンド・大蛇ヶ池公園	学校	7.3
	-1.1313	市立芸術大学	学校	7.2
	-1.1932	向島中学校グラウンド・向島二の丸小学校グラウンド	学校	7.0
~-1.0	-1.2505	洛東自動車教習所	その他	1.7
	-1.2698	日野野外活動施設	その他	1.6
	-1.4231	聖母女学院短期大学・深草中学校グラウンド	学校	9.9
	-1.5317	龍谷大学グラウンド	学校	6.0
	-1.5317	境谷小学校グラウンド・洛西中学校グラウンド・境谷公園	学校	6.0
	-1.5686	桂坂小学校グラウンド・大枝中学校グラウンド・国際日本文化研究センター	学校	5.9
	-1.7630	桂高等学校グラウンド	学校	5.4
	-1.9320	向島藤の木小学校グラウンド・向島東公園	学校	5.0
	-2.0216	桂川中学校グラウンド・川岡東小学校グラウンド・キヶ瀬公園	学校	4.8
	-2.7152	小栗栖中学校グラウンド・小栗栖小学校グラウンド	学校	3.5
	-2.9120	栗陵中学校グラウンド・池田小学校グラウンド	学校	3.2
	-2.9120	春日丘中学校グラウンド・日野小学校グラウンド	学校	3.2
	-3.0537	東山中・高等学校グラウンド	学校	3.0
	-4.5757	洛星高校グラウンド	学校	1.5

ことが魅力度の値を高めているものと推察される．図 5-9 から，こういった魅力度の高い広域避難場所は京都市の中心部に集中していることが分かる．この地域の住民は地震火災が発生しても高い確率で避難先を選択できるものと考えられるが，延焼火災の拡大状況によっては，多くの避難者が一つの避難場所に集中することで，中に収容できない避難者が発生することも予想される．一方，京都市の西部には魅力度の高い広域避難場所が殆ど存在しないことから，地震火災時には多くの避難者が避難先を選択できず市街地をさ迷う事態が懸念される．このため，消防や警察といった何らかの機関によって，住民を近隣の広域避難場所へ誘導することが求められる．

(2) 閾値の推定結果

閾値に関する定数($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$)は，次のように推定された．

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= -5.851 \times 10^{-3} \\ \alpha_2 &= 2.325 \times 10^{-3} \\ \alpha_3 &= 0.717 \\ \alpha_4 &= -0.132 \end{aligned} \right\} \quad (5-12)$$

住民の在住期間に関する定数 α_1 は負の値と推定され，市街地での生活期間が長いほど閾値 $\bar{\Theta}_j$ が小さくなる（選択確率 P_R を高める）結果となった．一方で，避難場所までの距離に関する定数 α_2 は正の値と推定され，距離の増加は閾値 $\bar{\Theta}_j$ を高める（選択確率 P_R を低める）方向に働くことが分かる．また，避難を妨げる地理的な隙間に関する定数 α_3 についても正の値と推定されたことから，その存在は広域避難場所を避難先として考えるにあたっての障害となることが伺える．

5.4 避難先選択モデルの京都市全域への適用

ここでは，これまでに定式化を行った避難先選択モデルを京都市全域に適用することで，広域避難場所の流入避難者数を推定し考察を加える．

5.4.1 計算条件

表 5-5 は，計算を行うにあたって設定した条件を示したものである．計算領域は京都市の町丁目のうち年齢別人口の判明している 4,565 町丁目とした．計算人数は京都市に居住する 15 歳以上の男女 1,283,373 人とし，それぞれの町丁目の年齢別人口は平成 17 年国勢調査年齢 5 歳階級別人口に基づいて設定した．ただし，住民の初期位置は居住する町丁目の重心で代表させ，その在住期間は調査から得られた年齢別の在住期間の確率密度分布（表 5-6）に基づいて無作為に設定した．また，避難を妨げる地理的な隙間については，市街地を分断する河川，軌道，山岳のうち 40m 以上の幅を有するものを設定した．

広域避難場所の流入避難者数を推定するにあたっては、住民は避難先の候補として考えた広域避難場所群の中から無作為に一つを選んで避難するものとし、各広域避難場所についてその人数を数え上げる手法を用いた。ただし本計算では、延焼火災の時間変化が避難行動に及ぼす影響を考慮しないものとし、広域避難場所を一つも避難先として考えることのできなかつた住民は流入避難者数に含めないものとした。

表 5-5 計算条件

計算人数	1,283,373 (京都市住民 15歳以上の男女)
町丁目数	4,565
町丁目の年齢別人口	平成17年国勢調査年齢5歳階級別人口
住民の初期位置	居住町丁目の重心
住民の在住期間	調査から得られた年齢別の確率密度分布
広域避難場所数	67
広域避難場所の魅力度	調査データに基づく推定値
避難障害となる地理的隙間	40m以上の幅を持つ河川・軌道・山岳

表 5-6 年齢別の在住期間の確率密度分布

年齢	標本数	在住期間の平均値 μ (年) (標準偏差 σ)	在住期間の確率密度 (1/年)					
			～1年	1～5年	5～10年	10～20年	20～40年	40年～
18～25歳	402	7.63 (9.39)	0.235	0.109	0.0135	0.0145	0.00588	0
26～35歳	334	12.32 (12.03)	0.154	0.0791	0.0277	0.00994	0.0146	0
36～45歳	295	23.02 (24.14)	0.0751	0.0512	0.0334	0.0181	0.00956	0.00302
46～55歳	251	32.77 (25.35)	0.0482	0.0161	0.0241	0.0185	0.0149	0.00475
56～65歳	371	39.93 (25.8)	0.0244	0.0142	0.0146	0.0133	0.0159	0.00659
66歳～	614	54.06 (23.98)	0.0148	0.00697	0.0108	0.0041	0.00926	0.0113

5.4.2 計算結果とその考察

図 5-10 は、広域避難場所を一つも避難先として考えることのできなかつた住民の町丁目人口に対する割合を示したものである。広域避難場所を一つも選択できなかつた住民の人数は 775,560 人であり、計算人数のおよそ 60%に相当する。上京区から左京区にかけて、および、右京区から西京区にかけての町丁目では、殆どの住民が何らかの広域避難場所を避難先として選択できたことが分かる。このことは、京都御苑・二条城・京都大学農学部グラウンド（上京区から左京区）、および、桂川・西京極総合運動公園（右京区から西京区）、といった魅力度の高い広域避難場所が近接して配置されていることによるものと考えられる。一方で、下京区から東山区にかけて、右京区の中心部、および、伏見区の東部では、多くの住民が広域避難場所を一つも選択できない結果となった。この要因としては、魅力度の高低によらず、周辺に広域避難場所が存在しないため、その分住民の閾値が増加したことが考えられる。なお、左京区の北部、右京区の北西部、西京区の西部、山科区の東部

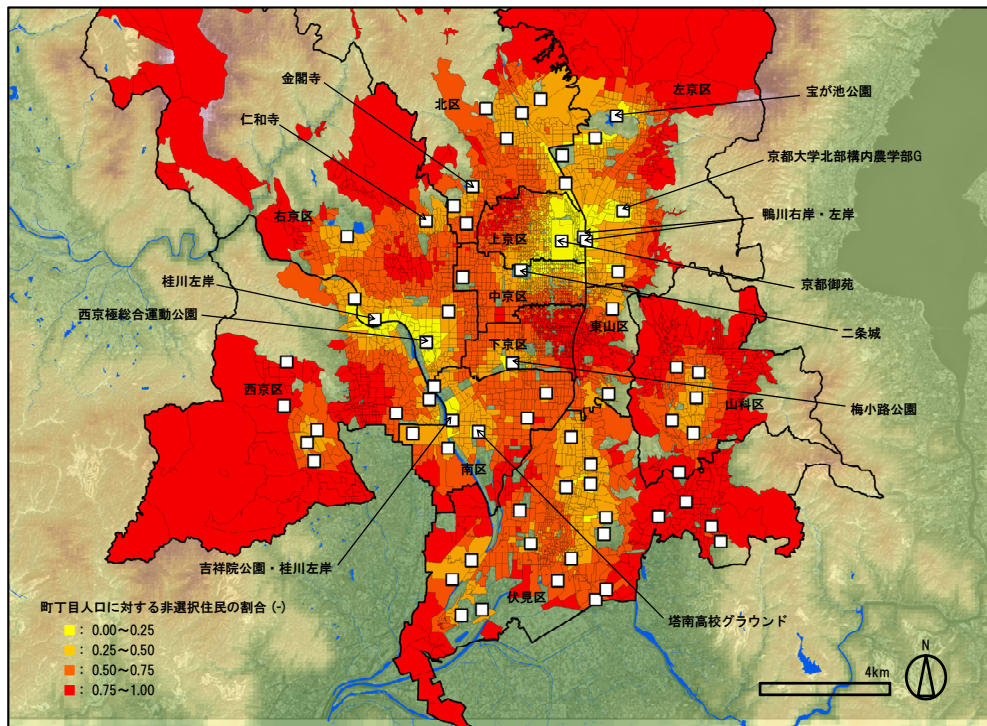


図 5-10 町丁目人口に対する非選択住民の割合

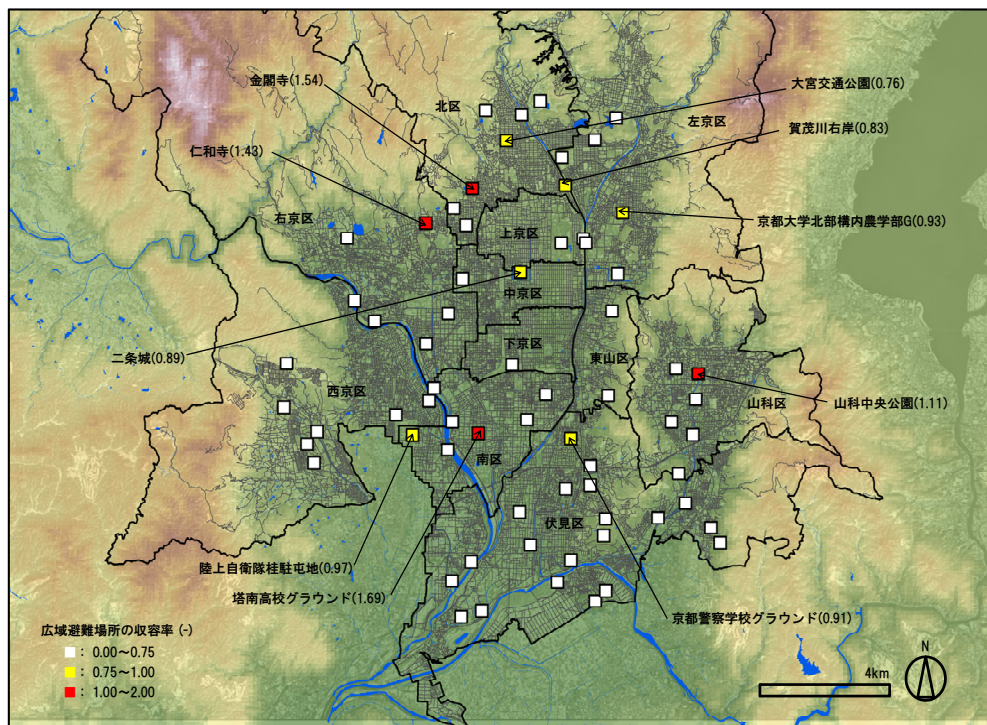


図 5-11 広域避難場所の収容率

といった山麓に位置する町丁目でも、広域避難場所を選択できない住民の割合は大きいですが、これは住民の初期位置である町丁目の重心がその面積の大きさによって広域避難場所から大きく離れることによるものと考えられる。

図 5-11 は、広域避難場所の収容可能人員[6]に対する流入避難者数の割合（以降では、広域避難場所の収容率と呼ぶ）を示したものである。ここでは、収容率が 0.75 未満の広域避難場所を白色、0.75 以上 1.0 未満のものを黄色、1.0 以上（収容可能人員を超過した）ものを赤色で示してあり、括弧付きの数値は収容率を表わしている。また、表 5-7 には、広域避難場所の収容率を一覧として整理した。ただし、広域避難場所を選択できなかった住民も、地震火災時にはその一部が周囲の避難者に追従することで避難場所に流入する可能性があることから、ここでの収容率の値は延焼火災の影響を考慮しない場合に見積もられる最低限の収容状況と考えられる。

図および表から、京都市によって指定されている広域避難場所の殆どが、最低限の収容可能人員を担保していることが伺える。ただし、「塔南高校グラウンド」、「金閣寺」、「仁和寺」、「山科中央公園・安祥寺中学校グラウンド・山階小学校グラウンド」の四か所の広域避難場所については、流入避難者数が収容可能人員を上回る結果となった。特に、塔南高校グラウンドや仁和寺は、魅力度の高い部類に属し（表 5-5）、その分避難者を引き付ける力が大きいにもかかわらず、避難に利用可能な安全面積が約 1.0ha と小さい（表 5-1）。このような魅力度の大きさと収容可能人員との隔たりが、地震火災時に避難者を十分に収容できない危険性を生んでいるものと考えられる。しかし、こういった収容不能危険のある広域避難場所の周辺では、基本的に収容率に余裕のある避難場所が存在している。このため、避難先を指示するといった対策により住民の避難先を分散させることで、このような避難上の問題を回避できる可能性がある。

5.5 まとめ

本章では、避難場所の魅力度を考慮して住民の避難先を予測する新たな手法の開発を行った。ここでは、避難先の決定構造を数学的に扱うために、

(I) 広域避難場所が潜在的に有する「魅力度 Φ 」

(II) 住民が避難先の候補として考えるための「閾値 Θ 」

の二つの概念を導入し、個々の住民がある広域避難場所を避難先の候補として考える確率をモデル化した。まず、2,267 名の住民に対してヒアリング調査を実施し、避難先選択を支配する要因が次の三つであることを把握した：

- 住民の在住期間
- 住民と避難場所の直線距離
- 避難を妨げる地理的な隙間の存在

次に、地震火災時における住民の避難先選択モデルをこれらの支配要因に基づいて定式化し、調査データを用いてモデルに含まれる未知パラメータを推定した。最後に、定式化した避難先選択モデルを京都市全域へと拡張することで、広域避難場所の流入避難者数を推定し考察を加えた。

表 5-7 広域避難場所の収容率一覧

No.	行政区	広域避難場所名称	分類	収容可能人員 (-)	流入避難者数 (-)	収容率 (-)
1	北区	京都ゴルフ場舟山コース(西賀茂)	その他	195,000	4,343	0.0223
2		大宮交通公園	公園	6,000	4,568	0.7613
3		金閣寺境内	歴史的空間	5,000	7,715	1.5430
4		立命館大学衣笠グラウンド	学校	9,000	6,219	0.6910
5		洛星高校グラウンド	学校	7,500	152	0.0203
6		京都ゴルフ場上賀茂コース	その他	195,000	5,750	0.0295
7	上京区	京都御苑	歴史的空間	173,500	36,443	0.2100
8	左京区	府立植物園・府立大学グラウンド	その他	140,000	8,656	0.0618
9		宝が池公園	公園	70,000	13,826	0.1975
10		京都大学北部構内農学部グラウンド	学校	21,500	19,961	0.9284
11		岡崎公園	公園	22,500	7,241	0.3218
12		宝が池公園スポーツ広場	公園	28,200	5,610	0.1989
13	中京区	二条城	歴史的空間	35,000	31,005	0.8859
14		島津製作所三条工場北グラウンド	その他	13,750	8,954	0.6512
15	東山区	日吉ヶ丘高校グラウンド・月輪中学校グラウンド・泉涌寺境内	学校	23,500	7,498	0.3191
16	下京区	梅小路公園	公園	50,000	25,815	0.5163
17	南区	殿田公園・陶化中学校グラウンド	公園	8,250	5,349	0.6484
18		上鳥羽公園(グラウンド)	公園	8,500	3,258	0.3833
19		吉祥院公園(グラウンド)・桂川左岸久世橋上流	公園	39,000	9,130	0.2341
20		塔南高校グラウンド	学校	5,000	8,434	1.6868
21		陸上自衛隊桂駐とん地	その他	5,000	4,872	0.9744
22		久世橋西詰公園	公園	15,500	3,573	0.2305
23		仁和寺境内	歴史的空間	6,500	9,313	1.4328
24	右京区	西京極総合運動公園	公園	36,000	22,743	0.6318
25		西院公園・デルタ自動車四条教習所	公園	11,250	7,436	0.6610
26		広沢の池付近・仏教大学グラウンド・堀川高校グラウンド	学校	90,000	12,667	0.1407
27		京都警察学校グラウンド・龍谷大学構内	学校	15,000	13,703	0.9135
28	伏見区	京都教育大学附属高校・消防学校グラウンド	学校	27,000	6,972	0.2582
29		京都教育大学構内	学校	26,250	11,781	0.4488
30		桃山御陵・伏見桃山城運動公園	その他	108,500	9,958	0.0918
31		伏見公園(グラウンド)	公園	9,500	4,533	0.4772
32		下鳥羽公園	公園	9,500	2,792	0.2939
33		三栖公園	公園	11,000	5,891	0.5355
34		小栗栖中学校グラウンド・小栗栖小学校グラウンド	学校	6,400	807	0.1261
35		栗陵中学校グラウンド・池田小学校グラウンド	学校	5,600	799	0.1427
36		春日丘中学校グラウンド・日野小学校グラウンド	学校	6,250	458	0.0733
37		日野野外活動施設	その他	7,850	925	0.1178
38		向島南小学校グラウンド・宇治川公園	学校	27,950	4,065	0.1454
39		向島中学校グラウンド・向島二の丸小学校グラウンド	学校	10,450	3,271	0.3130
40		向島藤の木小学校グラウンド・向島東公園	学校	24,350	1,611	0.0662
41		伏見北堀公園	公園	18,650	3,448	0.1849
42		羽東師運動広場	公園	13,850	5,249	0.3790
43		京都府警察自動車運転免許試験場	その他	27,550	1,751	0.0636
44		横大路運動公園	公園	64,000	1,962	0.0307
45		京都競馬場(駐車場)	その他	60,500	1,988	0.0329
46	山科区	聖母女学院短期大学・深草中学校グラウンド	学校	7,500	2,012	0.2683
47		山科中央公園・安祥寺中学校グラウンド・山階小学校グラウンド	公園	10,050	11,164	1.1108
48		東山中・高等学校グラウンド	学校	6,650	689	0.1036
49		東野公園・山科中学校グラウンド	公園	19,400	12,300	0.6340
50		洛東自動車教習所	その他	8,100	2,431	0.3001
51		龍谷大学グラウンド	学校	26,800	1,205	0.0450
52		勤修寺公園・勤修中学校グラウンド	公園	19,000	7,185	0.3782
53	西京区	桂高等学校グラウンド	学校	9,000	1,723	0.1914
54		桂川中学校グラウンド・川岡東小学校グラウンド・牛ヶ瀬公園	学校	11,950	1,235	0.1033
55		小畑川中央公園	公園	44,850	7,615	0.1698
56		境谷小学校グラウンド・洛西中学校グラウンド・境谷公園	学校	13,000	2,059	0.1584
57		竹の里小学校グラウンド・大蛇ヶ池公園	学校	11,150	2,863	0.2568
58		桂坂小学校グラウンド・大枝中学校グラウンド・国際日本文化研究センター	学校	29,000	793	0.0273
59		市立芸術大学	学校	17,100	1,371	0.0802
60	—	賀茂川右岸(御園橋より上流)	河川	11,250	6,971	0.6196
61	—	賀茂川右岸(上賀茂橋～菱橋)	河川	20,000	16,544	0.8272
62	—	鴨川右岸(賀茂大橋～丸太町橋)	河川	15,500	7,952	0.5130
63	—	鴨川左岸(賀茂大橋～丸太町橋)	河川	13,500	10,035	0.7433
64	—	円山公園(将軍塚周域)	公園	39,300	4,899	0.1247
65	—	桂川左岸(桂大橋～東海道線)	河川	40,000	7,549	0.1887
66	—	桂川左岸(松尾橋～上野橋)	河川	31,500	16,338	0.5187
67	—	桂川右岸(嵐山公園～松尾橋～上野橋)	河川	68,500	20,340	0.2969

※ 広域避難場所の分類は、「学校」・「公園」・「河川」・「歴史的空間」の4つに分類し、これらに当てはまらないものは、「その他」とした。

本章で推定した広域避難場所の魅力度は仮想的な概念であるため、推定値の妥当性については十分な検証を行えなかったものの、導入した二種類の概念量を定量化することができた。このため、本章で推定したパラメータを用いれば、避難場所の魅力度の偏りを考慮して住民の避難先を予測することが可能になった。その例として、本章 4 節では、延焼火災の時間変化を考慮しない場合に限定して、広域避難場所の流入避難者数を推定することができた。今後は、開発した避難先選択モデルを第 2 章で定式化した避難性状予測モデルに組み込むことで改良を加える予定である。その結果、時々刻々と変化する延焼火災の影響下での避難性状がより合理的に予測可能となり、対策の有効性評価のための効果的なツールとなることが期待される。

参考文献

- [1] 中央防災会議: 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 1923 関東大震災, 2006.7
- [2] 吉村昭: 関東大震災, 文春文庫, 2004
- [3] 建設省: 都市防火対策手法の開発, 建設省総合技術開発プロジェクト, pp.137-154, 1982.12
- [4] 小出浩一・森脇哲男: 大震火災時の広域避難に関する住民の意識調査報告, 日本建築学会論文報告集, No.315, pp.171-178, 1982.5
- [5] 青木義次・大佛俊泰: 地震時避難行動に関する意識調査 -地震時避難行動の情報伝達作用モデルの研究 その 1-, 日本建築学会関東支部研究報告集, No.60, pp.201-204, 1990.1
- [6] 京都市防災会議: 京都市地域防災計画 震災対策編, 京都市消防局防災対策室防災課, 2010.1
- [7] 日本火災学会: 1995 年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書, 1996.11
- [8] 朝日新聞社: 報道写真全記録 阪神淡路大震災, 1995.3

第 6 章

避難性状予測モデルの検証

6.1 はじめに

これまでの章では、地震火災時における住民の都市避難をポテンシャルの概念に基づいて予測する手法の定式化を行ってきた。この避難モデルでは、水が高い所から低い所に向かって流れるように、危険度の高い所から低い所に向かって住民の避難が行われるものと考え、この危険度を決定する要因として、(1) 燃焼建物からの輻射と熱気流、(2) 市街地の避難場所、の二つを考え、それぞれによる影響を (I) 火災危険度ポテンシャル、(II) 心理危険度ポテンシャル、として個別に評価した後合成することで、避難経路となる道路ネットワークの総合的な危険性を評価している。

このような手法では、避難者の移動メカニズムが危険度によって明示的に定式化されるため、多様な安全対策の効果を定量的に評価することが可能になっている。ただし、対策効果の評価値が合理的な値であるかは、避難モデルそのものの予測精度に大きく依存する。このため、効果的な安全対策の立案には、モデルが適切な精度をもって避難性状を予測できる必要がある。

そこで本章では、数値シミュレーションによる計算結果と、過去に発生した地震火災の被災調査報告を比較することで、これまでに構築した避難性状予測モデルの妥当性について検証する。ここでは、過去の地震火災の中でも最大の規模で避難が行われた関東大震災（1923）をとりあげ、避難シミュレーションを実施する。このとき、シミュレーションの入力条件として必要な燃焼領域の時間変化については、当時の市街地を構成していた建物群の詳細な資料が現存しないため、第 3,4 章で構築した延焼モデルを利用することはできない。そこで、被災調査から作成された延焼動態図を基に、当時の火災を再現する手法を用いる。避難シミュレーションの計算結果は、避難不能者の数やその発生箇所といった点から被災調査報告との比較を行い、モデルで採用するポテンシャル概念の有効性と、モデルの全体的な予測精度について検証する。

6.2 関東大震災(1923)の再現

1923 年 9 月 1 日に発生した関東大震災による被害は、東京都、神奈川県、千葉県、静岡県、南関東地方を中心とした関東一円に及び、十万棟を超える家屋の倒壊と多数の火災が発生した。このうち、東京市での死者数は 68,660 人と報告されているが、その殆どの 65,902 人は火災を原因とするものとされている[1]。そこで、ここでのモデル検証は、火災による人的被害が特に甚大であった東京市を扱うこととする。

6.2.1 震災(東京市)の概要

東京市での被害の概要を整理したものが表 6-1 である[2-4]。午前 11:58 頃に東京市を直撃したマグニチュード 7.9 の地震は、その直後に約 60 件の出火を誘発した。これらの一部は、東京市近辺に停滞していた低気圧による折からの強風にあおられて拡大し、市街地の広大な範囲を巻き込む大火へと発展した。地震の直撃後も余震等によって火災の発生は引き続き、飛び火による延焼が多発したこともあって、大火は 9 月 3 日午前 10:00 の鎮火に至るまで、約 2 日間もの間燃え続けた。その結果、焼失面積 3500ha、焼失棟数 22 万棟、避難者数 140 万人という甚大な被害がもたらされた。東京市の被災地域の範囲（濃色）を図 6-1 に示す。地震が東京市を直撃した時刻はほぼ正午であり、調理のための火器が市街地で多数使用されていたことが、全体で 100 件もの出火をもたらした。加えて、震災当時は現在のように消防力が充実しておらず、市街地には防火的に脆弱な木造建物が密集していたため、火災は比較的容易に隣棟へ拡大していったものと考えられる。

震災当時の気象状況は東京市内のいくつかの地点で観測されているが、このうち被災地域に近い中央气象台の観測結果を整理したものが表 6-2 である。市街地風の風速は、地震発生から翌朝までの間で特に大きく、基本的には 10m/s を超える風が吹いていた。この間、市街地風は南の風から北西の風へと急激に変化し、その後は南西の風が支配的となっている。このように、風向の急変と強風が重なった時間帯の避難者は、その行動が制限され、避難に大きな支障が生じたものと推察される。

火災によって死亡した避難者の数は全体の 5%程度であり、残りの 130 万人は危険を免れたことになるが、その多くは広場や公園といった比較的広めの空き地へ逃げ込んだ。当

表 6-1 東京市の被害概要[2-4]

出火時刻	1923. 9. 1 11:58 AM
鎮火時刻	1923. 9. 3 10:00 AM
出火件数	98
焼失棟数	219, 084
焼失面積	34, 664, 251m ²
焼失建築面積	17, 579, 583m ²
被災者数	1, 356, 740
死亡者数	68, 660 (火災:65, 902 倒壊:2, 758)

時の避難場所のうち代表的なものについて、その避難状況を整理したものが表 6-3 である。こうした数値は、地震後の混乱した状況を考えると信頼性の高い資料とは言えないが、いくつかの避難場所で避難者が過密の状態であったことが伺える。特に、多くの避難者は荷車等を用いて家財を携帯しながら避難したため、避難場所は避難者とその荷物で混雑した。こうした当時の避難場所の様子を撮影したものが図 6-2 である。中でも被服廠跡には、4 万人もの避難者が集結し一時は危険を免れていたものの、その後襲来した旋風に巻き込まれ 3 万 8 千人の避難者が死亡した。

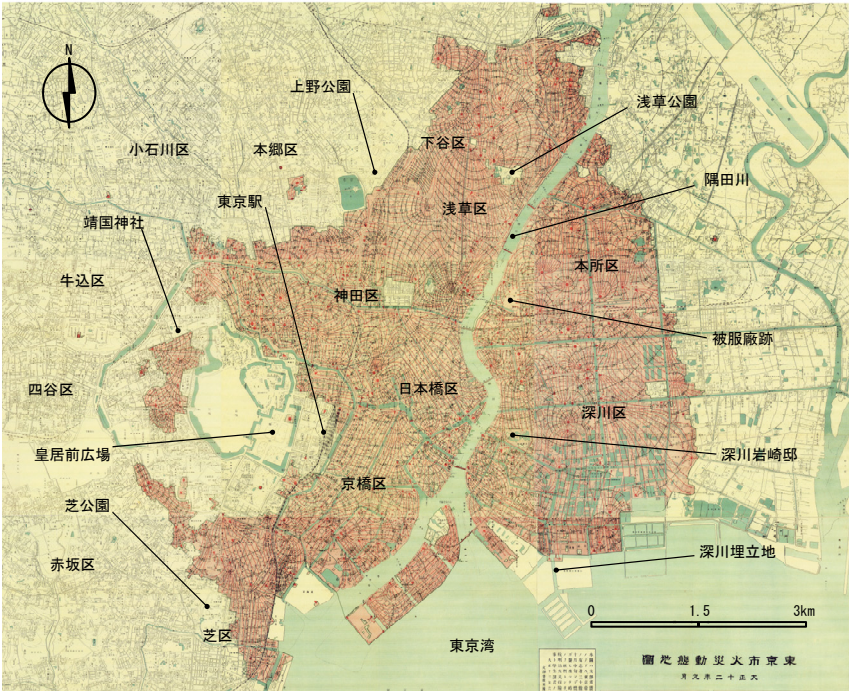


図 6-1 東京市の被災地域

表 6-2 気象状況の観測結果[2]

地震発生	9/1				9/2				9/3				鎮火
	日時	気温(℃)	風速(m/s)	風向	日時	気温(℃)	風速(m/s)	風向	日時	気温(℃)	風速(m/s)	風向	
↓	11h	28.0	11.0	S	4h	31.0	13.0	N	21h	27.2	7.0	SSW	↑
	12h	28.8	12.0	SSE	5h	30.5	11.0	NNW	22h	27.1	5.0	S	
	13h	29.0	11.5	S	6h	30.2	8.0	NNW	23h	27.1	5.0	S	
	14h	29.5	11.2	SSW	7h	28.0	8.0	NW	0h	27.5	6.0	S	
	15h	29.6	11.0	S	8h	26.4	5.4	N	1h	27.5	7.0	SSE	
	16h	30.0	11.0	SW	9h	27.8	4.9	SW	2h	27.3	8.5	SSE	
	17h	28.2	14.0	SSW	10h	27.0	5.0	SW	3h	27.0	7.5	SE	
	18h	29.0	14.5	WSW	11h	26.7	5.0	SW	4h	25.8	7.0	S	
	19h	29.8	14.0	W	12h	26.5	5.4	SW	5h	25.3	4.2	S	
	20h	29.0	10.2	NW	13h	27.0	6.5	SSW	6h	25.5	4.9	S	
9/2	21h	30.0	19.0	NNW	14h	27.5	6.0	SSW	7h	26.0	6.0	S	↑
	22h	32.0	19.5	NNW	15h	27.2	6.0	SSW	8h	28.0	8.0	S	
	23h	32.8	22.0	NW	16h	27.5	6.0	SSW	9h	28.0	10.0	S	
	0h	32.8	18.0	NNW	17h	27.3	8.5	WSW	10h	29.0	9.6	S	
	1h	32.8	17.0	NNW	18h	27.2	8.0	WSW	11h	28.5	12.0	S	
	2h	32.0	16.0	NNW	19h	27.5	8.0	SW	12h	28.0	11.5	S	
	3h	31.5	14.0	N	20h	27.3	8.2	SW					

表 6-3 避難場所の収容状況[2]

避難場所名称	避難人数(人)	敷地面積(ha)	避難者密度(m ² /人)
上野公園	500,000	83.5	1.67
浅草公園	70,000	31.7	4.53
深川岩崎邸	20,000	9.5	4.75
芝公園	50,000	48.2	9.64
靖国神社	50,000	5.0	1
深川埋立地	50,000	不明	不明
被服廠跡	40,000	10.3	2.58
皇居前広場	300,000	76.7	2.56



図 6-2 上野公園の様子

6.2.2 計算条件

計算にあたって設定した条件を表 6-4 に示す．計算領域は図 6-2 に示す被災地域の外側に設定し，その中で被災した 1,355,906 人を計算対象とした．計算時間は地震発生から 43hrs とし，計算時間刻みを 1min として個々の避難者の行動を計算した．なお，避難者の移動方向を決定する避難ポテンシャル Φ_o の計算式には，いくつかの未知パラメータが含まれるが，詳細に記せば次のようになる．

$$\Phi_o = \chi_F (\dot{q}'' + h\Delta T) + \chi_P \sum_{i \in R} l_i \quad (6-1)$$

ここに，定数 χ_F は熱流束を，定数 χ_P は長さをポテンシャル Φ に変換する係数であるが，ポテンシャルは仮想的な値であるため，これら χ_F, χ_P の値は熱流束と長さの相対的な重みに等しい．そこで本計算では，定数 χ_P を 1.0 (m⁻¹) に固定し，定数 χ_F を試行錯誤的に決定した五通りの値 0.0, 10.0, 11.0, 12.0, 100.0 (m²/kW) として計算を行う．

(1) 避難経路と避難場所の条件

避難経路は、当時の市街地図から道路ネットワークを読み取ることで構築した。避難場所については、表 6-3 に示す代表的な 8 か所に限定し、その収容可能人員については制限を設けないものとした。なお、計算領域の境界に到達した避難者は、被災地域の外側へ避難したものとみなし、避難が完了するものと考えた。

心理危険度ポテンシャルの計算には、個々の住民が考える避難先を境界条件として与える必要がある。しかし、これに関する記録は殆どなく、第 5 章で構築した避難先選択モデルも関東大震災当時の住民には適用できない。そこで本計算では、住民は避難場所の全てを避難先の候補として一様に認識しているものとみなし、これらの避難場所を境界条件にして心理危険度ポテンシャルの分布を計算する。

(2) 延焼火災の条件

避難シミュレーションでは、延焼火災による燃焼領域の時間変化を入力条件として与える必要がある。ここでは、当時の市街地を構成する建物群の詳細な情報が不足していることを踏まえ、被災調査から作成された延焼動態図[5]を基に当時の火災を再現する。この延

表 6-4 計算条件

計算人数	1,355,906
計算時間	地震発生から43 (hrs)
計算時間刻み Δt	1.0 (min)
定数 χ_F	0.0, 10.0, 11.0, 12.0, 100.0 (m^2/kW)
定数 χ_P	1.0 (m^{-1})
避難経路ネットワーク	当時の市街地図から道路網を読み取って作成
避難場所の数	8 (代表的なもの)
避難場所の収容可能人員	無限
避難者の初期位置	行政区の被災人口に基づいて配置
避難を開始する限界熱流束 q_{cr}	2.0 (kW/m^2)
避難を開始する限界曝露温度 T_{cr}	313 (K)
人体の対流熱伝達率 h	0.02 ($\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$)
人体の表面温度 T_B	305 (K)
気温・風速・風向	中央気象台の観測結果
燃焼領域の時間変化	延焼動態図を基に再現
出火件数 (飛び火による出火を含む)	307
メッシュ幅	40 (m)
木材が単位量消費された場合の発熱量 ΔH_W	16000 (kJ/kg)
木造家屋の単位建築面積あたりの質量減少速度 m_W	0.06 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
火災旋風	考慮しない

焼動態図には、出火点の位置、飛び火の発生地点、火災の進行方向、一時間ごとの火災前線の位置が記録されている。本計算では、計算領域を幅 40m の格子状メッシュに分割し、火災前線がメッシュ重心を通過した時間を読み取ることで、メッシュの燃焼開始時間 t_0 を設定する。火災危険度ポテンシャルの計算に必要なメッシュの発熱速度 \dot{Q}_B については、燃焼時間との関係を次のようにモデル化した (図 6-3)。

$$\dot{Q}_B = \Delta H_w \cdot \dot{m}_w'' \cdot A_B \quad (6-2)$$

ただし、

$$A_B = \begin{cases} \alpha(t - t_0) & (t_0 \leq t < t_D) \\ cA_M & (t_D \leq t < t_F) \end{cases} \quad (6-3)$$

ここに、 ΔH_w ($\approx 16000 \text{kJ/kg}$) は木材が単位量消費された場合の発熱量[6]、 \dot{m}_w'' ($\approx 0.06 \text{kg/m}^2\text{s}$) は木造家屋の単位建築面積あたりの質量減少速度[7]、 A_B はメッシュ内の燃焼面積、 A_M はメッシュの面積、 t は時間、 t_D はメッシュの燃焼が成長期から盛期へ移る時間、 t_F はメッシュの燃焼が終了する時間、 α は燃焼面積の成長率、 c は盛期時の燃焼面積のメッシュ面積に対する割合である。このうち、燃焼開始から盛期を迎えるまでの時間 $t_D - t_0$ 、および、燃焼が終了するまでの時間 $t_F - t_0$ はそれぞれ 20min, 40min と設定した。盛期時の燃焼面積の割合 c は、当時の市街地の焼失面積 ($\approx 34.7 \text{km}^2$) に対する木造家屋の焼失建築面積 ($\approx 17.6 \text{km}^2$) の比率とみなし、0.51 と設定した[2]。なお、燃焼面積の成長率 α はこれらの値によって自ずと決定される。

式 (2-3) や式 (2-4) を用いて輻射熱流束と温度上昇を計算するには、熱源の位置を与える必要がある。このうち、温度上昇をもたらす熱気流については、その熱源をメッシュの重心で与える。一方の輻射熱流束については、メッシュ上方に形成される無風下の火炎を仮定し、次式より計算される火炎高さ h_M [8] の半分を熱源の位置として与える (図 6-4)。

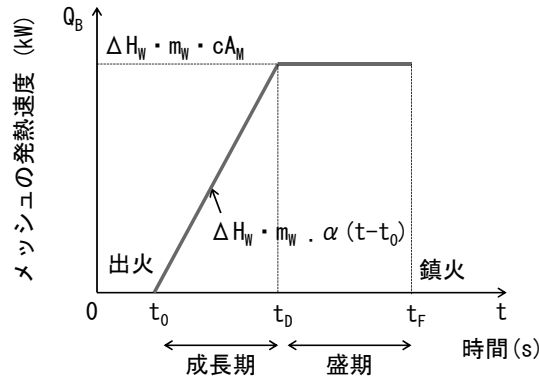


図 6-3 メッシュの発熱速度

$$\frac{h_M}{D} = 0.23 \frac{\dot{Q}_B^{2/5}}{D} - 1.02 \quad (6-4)$$

ここに、 D は火源径であり、計算上は $\sqrt{A_B}$ とする。

延焼動態図には火の粉による飛び火の発生が多数記録されているが、ここでは、その発生地点と時間を読み取ることで新たな出火点として扱う。その結果、火災の再現にあたっての出火点は307か所となり、その配置を示せば図6-5のようになる。また、市街地風の風速・風向と、外気温については、被災地域に近い中央気象台の観測記録(表6-2)を利用す

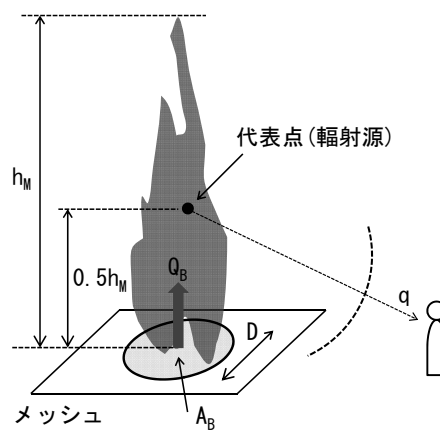


図 6-4 燃烧メッシュの輻射源

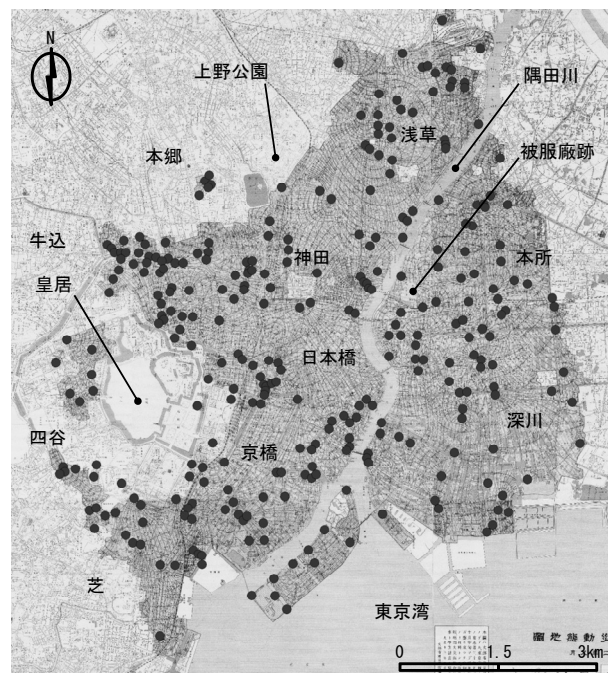


図 6-5 出火点の配置(●印)

る．なお，本計算で使用する延焼動態図には，被服廠跡等を襲った火災旋風に関する記載がないため，ここでの再現火災は，火災旋風の影響を除いたものに相当する．

(3) その他の条件

地震が発生した時に住民がどこに滞在しているかは，モデルの計算結果を大きく左右するため，モデル検証上，重要な設定と言える．しかし，これに関する詳細な情報は調査報告からも明らかでない．そこで本計算では，行政区ごとの被災人口[1,3]に基づいて住民の初期位置を設定するものとし，道路ネットワークの交差点上にその人数が概ね一樣になるように配置した．行政区の被災人口を整理すれば，表 6-5 のようになる．

住民が避難を開始する限界熱流束 q_{cr}'' は長谷見ら[9]を基に 2.0kW/m^2 ，住民が避難を開始する限界曝露温度 T_{cr} は東京消防庁[10]を基に 313K ，人体の対流熱伝達率 h は市街地風の影響を無視し $0.02\text{kW/m}^2\text{K}$ ，人体の表面温度 T_b は 305K と設定した．

表 6-5 行政区の被災人口[1,3]

行政区名称	夜間人口	被災人口	焼死者数
麹町区	56,117	29,402	61
神田区	143,757	175,421	1,221
日本橋区	123,961	115,905	1,172
京橋区	137,668	131,040	902
芝区	171,854	76,726	398
麻布区	86,083	45	131
赤坂区	55,258	9,832	77
四谷区	68,197	3,688	94
牛込区	118,642	0	0
小石川区	140,471	4,694	220
本郷区	123,055	32,736	291
下谷区	180,510	145,206	742
浅草区	251,469	216,290	3,225
本所区	248,452	240,788	53,620
深川区	173,600	174,867	3,748

6.2.3 計算結果とその考察

(1) 燃焼領域の拡大性状

再現火災の燃焼面積と市街地の焼失面積の推移を示したものが図 6-6 である．燃焼面積は，地震発生から 4 時間後と 8 時間後にピークを迎え，その後その勢力は衰え始めたことが分かる．図 6-7 は，これらの時間帯の延焼火災と熱気流の様子を示したものである．ここでは，

燃焼中のメッシュ、燃焼の終了したメッシュ、地上付近の温度上昇が $5K$ を超える地域をそれぞれ色分けで示してある。これによると、火災前線の近くには帯状の燃焼領域が形成されており、そこから発生する熱気流が $10m/s$ を超える市街地風に流されることで、風下側の広い範囲がその影響を受けている。また、熱気流に覆われる地域は、風向の変化によって各時刻で大きく異なることが分かる。火災に巻き込まれた地域は、地震発生から 4 時間後では依然として部分的であるものの、8 時間後にはいくつかの火災が合流し、本所、深川、神田といった地域の殆どが焼失する結果となった。図 6-6 を見ると、地震発生から 12 時間後までには、東京市 ($\approx 79.5km^2$) の約 40% が焼失している。それまでの市街地全体での巨視的な延焼速度を推定すれば $265ha/h$ となり、当時の火災が非常に速いスピードで市街地を巻き込んでいったことが伺える。

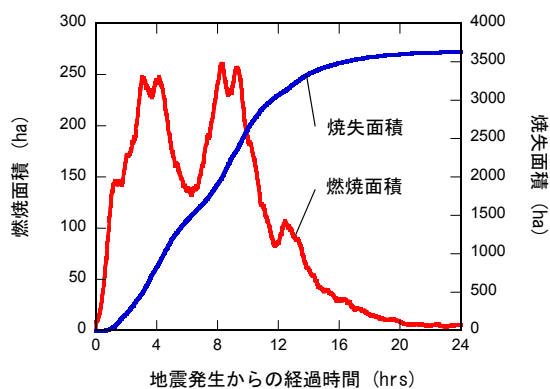
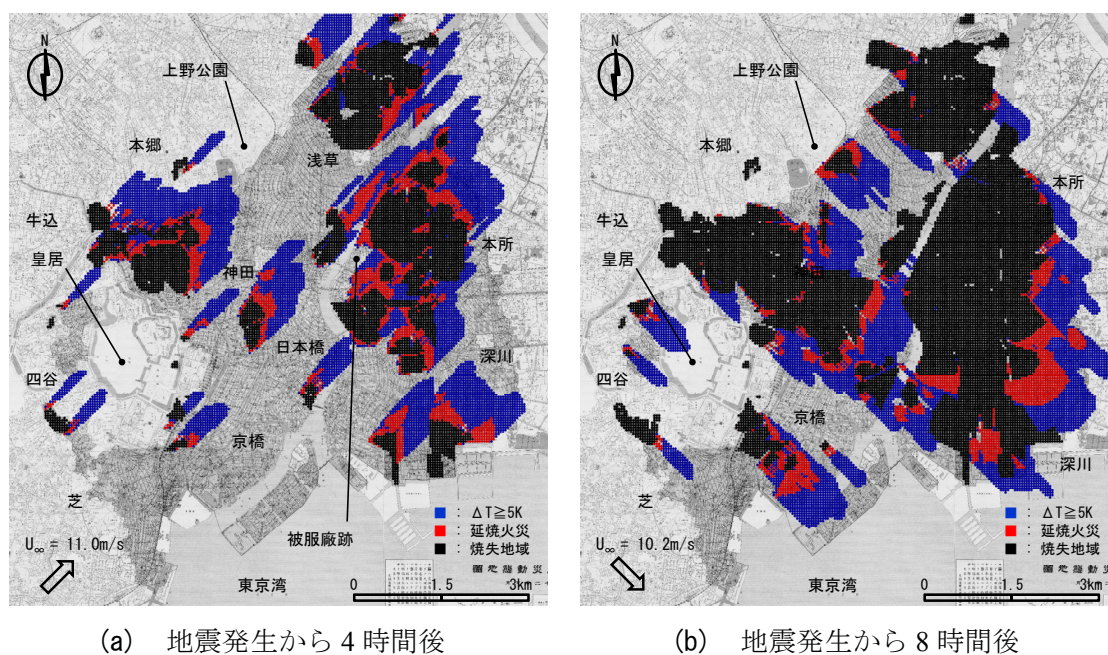


図 6-6 再現火災の燃焼面積と市街地の焼失面積



(a) 地震発生から 4 時間後

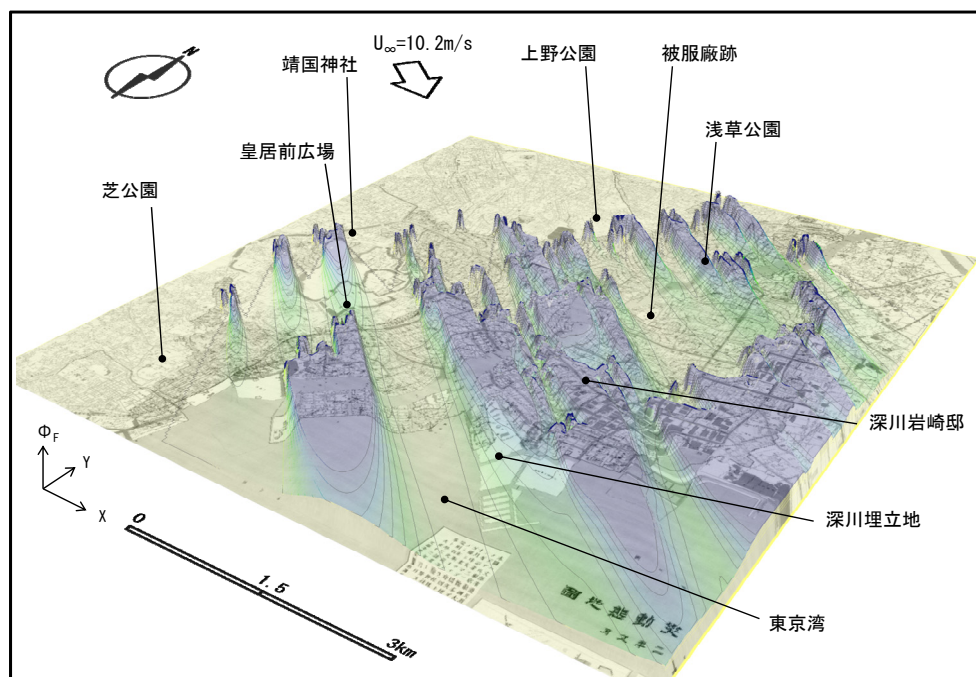
(b) 地震発生から 8 時間後

図 6-7 延焼火災と熱気流の様子

(2) ポテンシャルの空間分布

図 6-8 は、 $\chi_F = 11.0$ の場合に計算された各ポテンシャルの空間分布を示したものである。火災危険度ポテンシャルと避難ポテンシャルについては、火災の拡大に伴ってその値が変化するため、地震発生から 8 時間後の分布を示した。一方、心理危険度ポテンシャルは時間によらず一定である。なお、計算上のポテンシャルは道路ネットワークに沿った形で得られるが、ここでは、市街地全体へ補間したものをしてある。

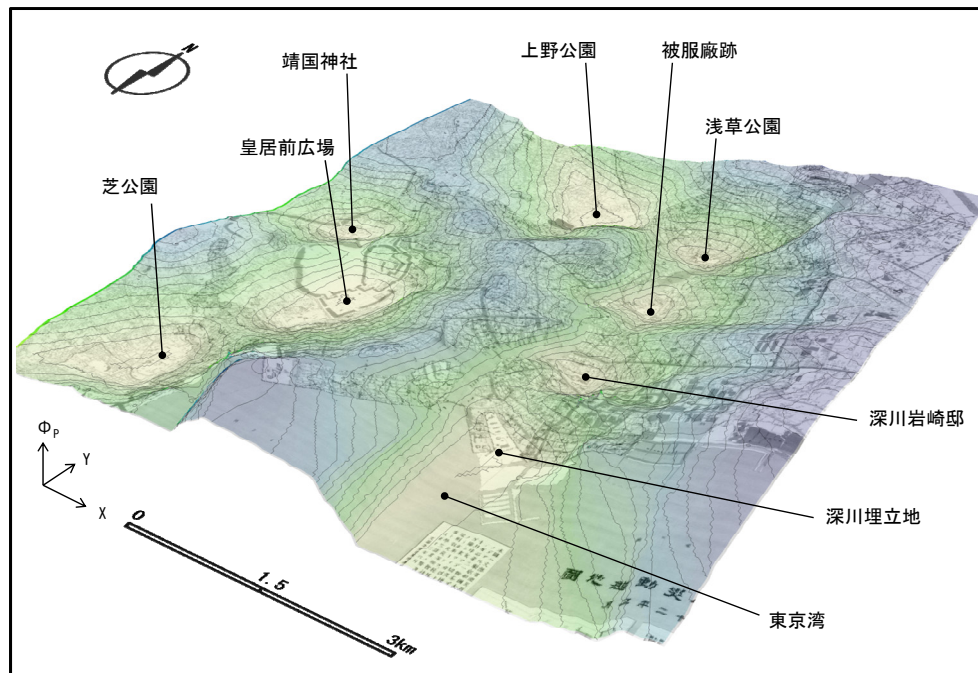
図 6-8. (a) を図 6-7. (b) と比較すると、火災危険度ポテンシャルの高い地域は、燃焼領域または熱気流の影響を受けている地域と一致することが分かる。熱気流の温度分布は燃焼領域に近いほど大きく、風下側または風横側に離れるほど小さくなるが、火災危険度ポテンシャルの値も、これに対応して風下・風横方向へ降下していることが分かる。このような火災危険度ポテンシャルの分布特徴は、火災影響の少ない地点に向かって避難が行われる様子を陽に表現できるものと考えられる。一方、図 6-8. (b) に示した心理危険度ポテンシャルの分布を見ると、避難場所を盆地の底のようにして、そこから遠ざかる方向に値が増加する分布が構築されている。ポテンシャルの値は底に向かって滑らかに降下していることから、避難場所に向かって避難が行われる様子を表現できるものと考えられる。図 6-8. (c) に示した避難ポテンシャルは、これら二種類のポテンシャルを合成することで得られる分布である。これによると、心理危険度ポテンシャルに見られた避難場所に向かう滑らかな分布が薄れ、熱気流によって作られた凹凸により、市街地には全体的に歪な分布



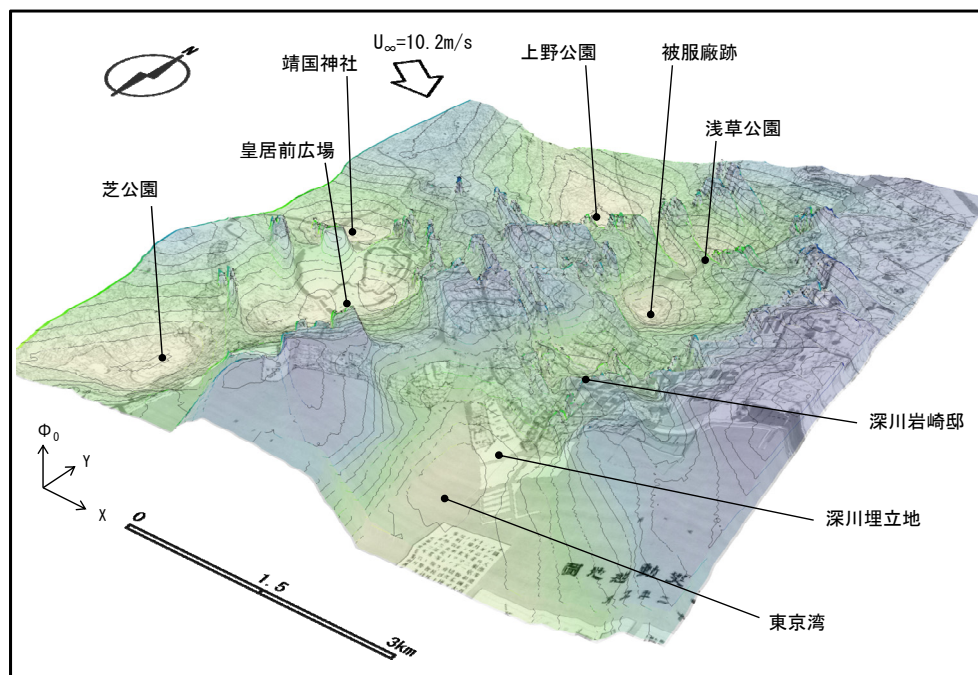
(a) 火災危険度ポテンシャル（地震発生から 8 時間後）

図 6-8 ポテンシャルの空間分布

が構築されている。このことは、輻射や熱気流といった火災からの影響が厳しくなれば、安全な避難場所へ順調に避難することは難しくなり、市街地をある程度さ迷うことになる



(b) 心理危険度ポテンシャル



(c) 避難ポテンシャル (地震発生から8時間後)

図 6-8 ポテンシャルの空間分布

可能性を示唆している．避難ポテンシャルの分布は，火災影響を避けつつも安全な避難場所に向かって避難が行われる様子を表現できるものと考えられるが，それには適切な重み定数 χ_F を与える必要がある．

式 (6-1) から分かるように，定数 χ_F と χ_P は熱流束と長さによって定まる二種類のポテンシャルの大きさ（標高）を，避難ポテンシャル Φ_0 の中で重み付けするものである．ただし，式 (2-27) で表わされるように，避難者の移動方向がポテンシャルの勾配に依存することに注意すると，正確には，避難者位置における二種類のポテンシャル勾配の大きさ（傾き）を，避難ポテンシャルの勾配の中で配分するためのパラメータであると言える．ここで，ある燃焼建物を原点 O にとった一次元座標系 (s) を導入し，原点 O から正の方向に遠ざかった地点に避難場所がある市街地を仮定する（図 6-9，横軸）．火災危険度ポテンシャル Φ_F のうち，輻射成分 ($\chi_F \cdot \dot{q}''$)，および熱気流成分 ($\chi_F \cdot h\Delta T$) の地点 s における勾配 δ は，式 (2-3, 2-4) を s で微分することで，次のように表わされる（図 6-9，縦軸）．

$$\begin{cases} \delta_R = -\chi_F \left(\frac{0.15}{\pi} \cdot \frac{\dot{Q}}{s^3} \right) \\ \delta_T = -\chi_F \left(40h \frac{\dot{Q}^{2/3}}{s^{8/3}} \right) \end{cases} \quad (6-5)$$

ここに， δ_R は輻射成分 ($\chi_F \cdot \dot{q}''$) の地点 s における勾配， δ_T は熱気流成分 ($\chi_F \cdot h\Delta T$) の

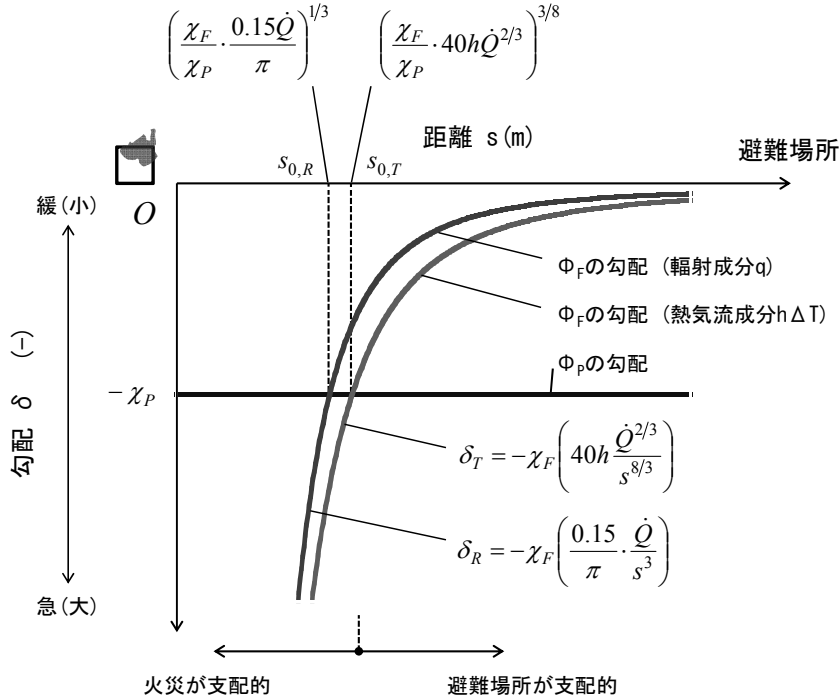


図 6-9 ポテンシャル勾配と重み定数の関係

地点 s における勾配である。ただし、熱気流の温度上昇 ΔT は、簡単のため、気流軸上の温度上昇 ΔT_0 で与えた。一方、心理危険度ポテンシャル Φ_p の地点 s における勾配 δ_p は、式(2-17)と同様に、次式で表わされる。

$$\delta_p = -\chi_p \quad (6-6)$$

このとき、避難ポテンシャルの勾配の中で、火災による傾きと避難場所による傾きが釣り合う地点 s_0 は、次のように表わされる。

$$\begin{cases} s_{0,R} = \left(\frac{\chi_F}{\chi_p} \cdot \frac{0.15\dot{Q}}{\pi} \right)^{1/3} \\ s_{0,T} = \left(\frac{\chi_F}{\chi_p} \cdot 40h\dot{Q}^{2/3} \right)^{3/8} \end{cases} \quad (6-7)$$

ただし、 $s_{0,R}$ は輻射成分による傾き δ_r と避難場所による傾き δ_p が釣り合う地点、 $s_{0,T}$ は熱気流成分による傾き δ_t と避難場所による傾き δ_p が釣り合う地点である。式(6-7)の関係は、避難者の移動方向を支配する要因が輻射や熱気流といった火災危険から市街地の避難場所へと移る境界 s_0 が、二種類の定数の比率(χ_F/χ_p)によって定まることを意味している。すなわち、燃焼建物から距離 s_0 までの範囲では、火災によって決まるポテンシャル勾配の影響が大きく、火災影響を避ける方向への移動が支配的になる。逆に、燃焼建物から距離 s_0 以上離れると、避難場所によって決まるポテンシャル勾配の影響が大きくなり、避難場所に向かっての移動が支配的になる。

ここで、燃焼建物の発熱速度 \dot{Q} を燃焼が盛んな状態を想定して50,000kW、人体の対流熱伝達率 h を0.02 kW/m²Kと置くと、 $\chi_F=11.0$ 、 $\chi_p=1.0$ の時の釣り合い距離 s_0 は、

$$\begin{cases} s_{0,R} \approx 29.5 \\ s_{0,T} \approx 33.8 \end{cases} \quad (6-8)$$

と計算され、数十メートルのオーダーとなる。ただし、建物が密集する市街地では、輻射熱の伝達経路に遮蔽物が存在するため、現実的には、輻射成分の釣り合い距離 $s_{0,R}$ は上記の値よりも小さくなると考えられる。また、実際の市街地火災では、複数の建物が同時に燃焼することから、気流成分の釣り合い距離 $s_{0,T}$ は上記の値よりも大きくなることが予想される。図6-8.(c)に示した避難ポテンシャルの分布は、全体的に心理危険度ポテンシャルの影響を比較的大きめに受けているように見えるが、式(6-8)からも分かるように、火災危険度ポテンシャルの影響は燃焼領域から比較的狭い範囲に限定されることが伺える。

(3) 避難者の移動軌跡

$\chi_F=11.0$ の場合に計算されたある避難者の移動軌跡を示したものが図6-10である。ここ

での移動軌跡は、地震発生から4時間(9/1・16時)が経過した頃の様子であり、図6-7.(a)に対応している。また、避難者の移動軌跡を実線で、16時における火災前線の位置と地上付近の温度上昇が5Kを超える地域を点線で示してある。

日本橋に滞在していたこの住民は、付近で発生した延焼火災が比較的近くまで拡大してきたことで、避難を開始したものと考えられる。避難を開始した時刻は9/1の15:50であるが、この辺りでは10m/sを超える市街地風が南西から吹いていたため、住民の熱気流の曝露は少なく、このことが火災接近後の避難につながったものと考えられる。その後、避難者は市街地風に逆らうように南西方向へ移動し、基本的には大通りを避難経路に選びながら、16:16に皇居前広場(避難場所)に到着した。この時間帯では、いくつかの延焼火災が数十街区を巻き込んだ後も燃焼を継続しているが、避難経路となった大通り付近には火災や熱気流が到来していなかったため、避難中の熱的影響は少なかったものと考えられる。この避難者が移動した総距離は約2kmであり、平均の移動速度は1.28m/sと推定されることから、通過した道路はすいており、周囲の歩行者の影響をほとんど受けずに避難できたことが伺える。

(4) 避難不能者の人数と発生箇所

定数 χ_F を0.0, 10.0, 11.0, 12.0, 100.0 (m^2/kW)の五通りに変化させた各条件について、計算された避難不能者の最終的な人数を整理したものが表6-6である。被災調査から報告されている東京市の火災死亡者数は65,902人であるが、この中には火災旋風によって死亡した避難者も含まれる。そこで、被服廠跡での推定死亡者数38,000人を除いた27,902人をモデ

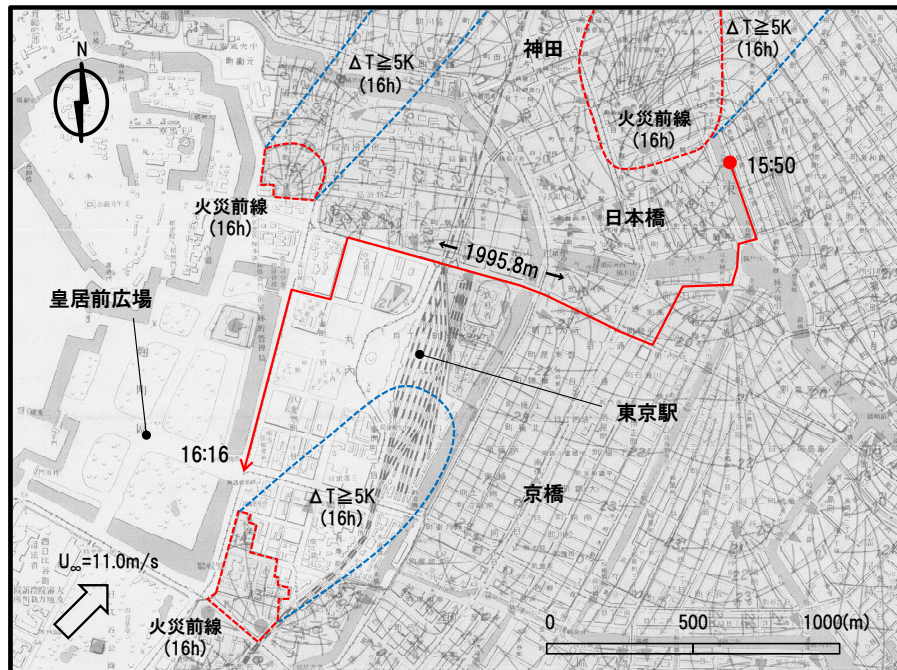


図6-10 避難者の移動軌跡

ル検証にあたっての指標と考える。このとき、避難不能者の最終的な人数は計算条件 $\chi_F = 11.0$ の場合 (29,097 人) に最も良く一致した。なお、計算条件 $\chi_F = 100.0$ は、避難者が火災からの影響を支配的に考えて移動方向を決定する場合である。このような場合では、避難者が火災から逃げ惑うだけで避難場所に向かうことができず、そのうち逃げ場を失うことになるため、避難不能者の人数が過大に評価されたものと考えられる。一方、計算条件 $\chi_F = 0.0$ では、避難者は火災を無視して避難場所に向かって移動するだけになる。結果的に、避難不能者の人数は調査報告よりも小さく推定されたが、火災に近づくことに対する抵抗を考えると、現実的ではない。

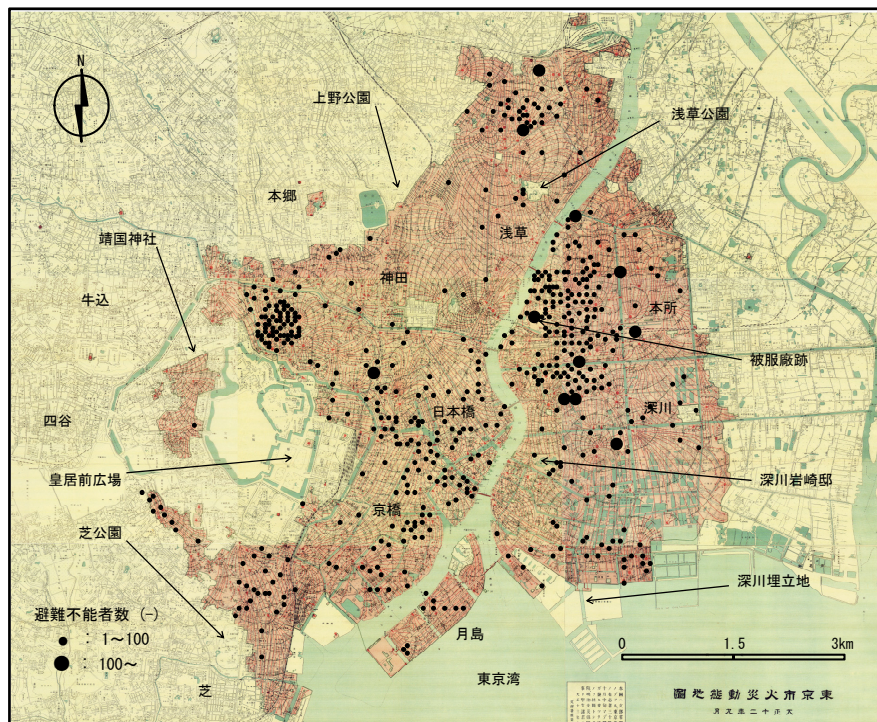
図 6-11 は、計算された避難不能者の発生箇所を調査報告と比較したものである。ここでは、計算条件 $\chi_F = 11.0$ の場合に得られた結果を示してあり、●印の大きさが避難不能者の発生数に相当する。本モデルの計算結果では、避難不能者が浅草公園の北部、本所、深川、靖国神社の東部に集中して発生している。このような避難不能者の発生箇所の全体的な傾向は、調査報告と概ね類似しているものと考えられる。ただし、月島といった調査報告では避難不能者の少ない地域で、その人数が過大に評価されたり、逆に、日本橋といった調査報告では数の多い地域で、その人数が過小に評価されていることも分かる。このような誤差の要因として、設定した避難者の初期位置の信頼性に限界があることが挙げられる。本計算では、東京市の行政区別の被災人口に基づいて、行政区内の人口分布が概ね一様になるように初期位置を設定した。このため、地震発生当時には殆ど人のいなかった地域にも、避難者が多く配置されている可能性があり、逆に、多くの人で混在していた地域では、その人数が当時よりも少なめに設定されている可能性がある。

(5) 避難場所の収容状況

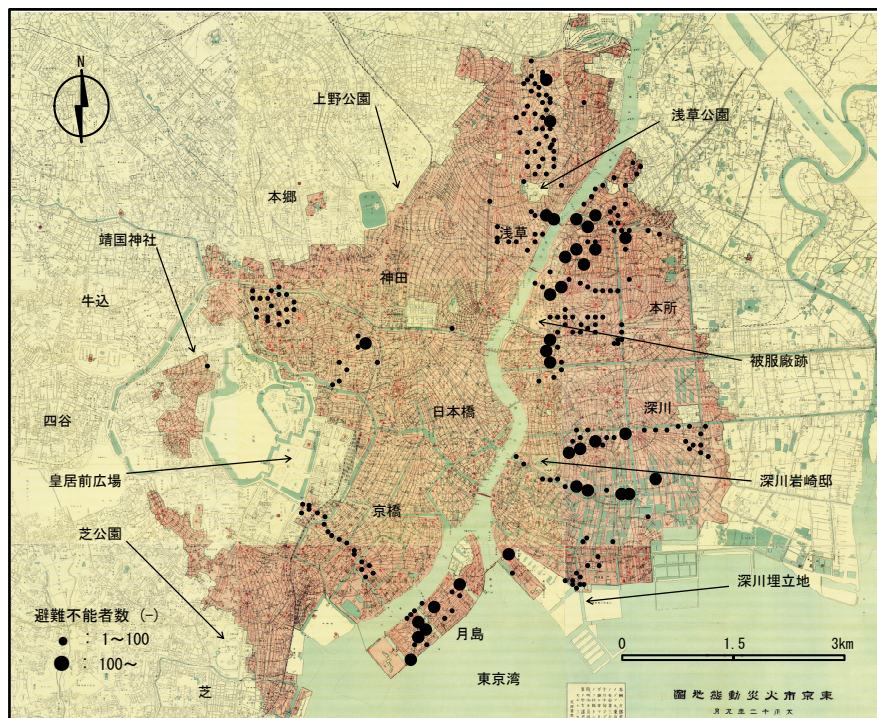
各避難場所に避難した人数について、計算条件 $\chi_F = 11.0$ の場合に得られた結果と調査報告による値を比較したものが表 6-7 である。本モデルでは、避難場所に向かって移動する避難者の様子を心理危険度ポテンシャルによって表現したが、いずれの避難場所にも多くの避難者が集まったことが分かる。ただし、いくつかの避難場所では、避難人数の値が調査報告に比べて過大に評価される結果となった。この主要な要因として、次のことが挙げられる：(1) 計算にあたって設定した避難場所の数が不足していること；(2) 避難場所が潜在的に避難者を引き付ける程度（魅力度）のばらつきを考慮していないこと。本計算では、

表 6-6 避難不能者数の推定値

定数 χ_F (m^2/kW)	避難不能者数 (モデル)	避難不能者数 (調査報告)
0.0	8,045	27,902 (被服廠跡での火災旋風 による死亡者を除く)
10.0	18,985	
11.0	29,097	
12.0	36,609	
100.0	179,430	



(a) 調査報告



(b) モデルの計算結果

図6-11 避難不能者の発生箇所

調査報告の中で避難人数が多かった代表的な避難場所のみを扱ったが、本来はそれ以外の避難場所にもある程度の避難者が収容されたものと考えられる。このような計算条件の設定上の避難場所の不足が、避難人数の過大評価に影響を及ぼしているものと考えられる。また、文献[2,11]によれば、当時の避難者の多くは上野公園や皇居前広場といった広大なオープンスペースを意識的に目指して移動したことが報告されている。本計算では、こうした避難場所の魅力度の偏りを無視することで避難シミュレーションを行った。このため、当時魅力度の高かった避難場所では、避難人数が少なめに評価され、逆に、魅力度が左程高くなかった避難場所では、過大な推定結果になった可能性が考えられる。

表 6-7 避難場所の収容人数の推定値

避難場所名称	避難人数(調査報告)	避難人数(モデル)
上野公園	500,000	149,796
浅草公園	70,000	247,469
深川岩崎邸	20,000	151,968
芝公園	50,000	54,404
靖国神社	50,000	69,998
深川埋立地	50,000	70,776
被服廠跡	40,000	227,075
皇居前広場	300,000	209,475

6.3 まとめ

本章では、過去の地震火災の中でも最大の規模で避難が行われた関東大震災(1923)に着目し、避難シミュレーションによる計算結果と被災調査報告を比較することで、本研究の基幹である避難性状予測モデルの妥当性について検証した。避難シミュレーションにあたっては、入力条件として必要な燃焼領域の時間変化を、被災調査から作成された延焼動態図を基に再現した。計算結果では、避難性状予測モデルに導入した三種類のポテンシャルについて、その空間分布を可視化し、ポテンシャルの概念が地震火災時の都市避難予測に有効であることを確認した。また、避難不能者の最終的な人数は、定数 χ_F を調整した場合に被災調査報告と概ね一致する結果が得られた。ただし、避難不能者の発生箇所や避難場所の避難人数については、一部で調査報告と類似する結果が得られたものの、残りでは調査報告との間に幾分の誤差が見られる結果となった。この主要な要因として、次のことが挙げられる：

- 設定した避難者の初期位置の信頼性に限界があること
- 計算にあたって設定した避難場所の数が不足していること
- 避難場所の魅力度の偏りを考慮していないこと

今後は、こうしたモデル上の誤差が生じた要因を確認し、必要に応じて新たなモデル化を行っていく必要がある。

参考文献

- [1] 諸井孝文・武村雅之: 関東地震(1923年9月1日)による被害要因別死者数の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.4, No.4, pp.21-45, 2004.9
- [2] 中央防災会議: 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 1923 関東大震災, 2006.7
- [3] 大日本震災調査会: 振天動地 大震災史, 1923.4
- [4] 震災予防調査会: 震災予防調査会報告 100 号, 1925
- [5] 震災予防調査会: 震災予防調査会報告 100 号戊付図, 1925
- [6] Huggett, C.: Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Method, Fire and Materials, Vol.4, No.20, 1980
- [7] 建築物の防火設計法開発のための木造住宅火災実験報告書, 建築研究資料, No.54, 建設省建築研究所, p.20, 1985.9
- [8] Heskestad, G.: Luminous Height of Turbulent Diffusion Flames, Fire Safety Journal, Vol.5, pp.103-108, 1983
- [9] 長谷見雄二・重川希志依: 火災時における人間の耐放射限界について, 日本火災学会論文集, Vol.31, No.1, pp.7-14, 1981.6
- [10] 東京消防庁: 消防科学研究所報 31 号, pp.131-136, 1994
- [11] 吉村昭: 関東大震災, 文春文庫, 2004

第 7 章

避難シミュレーションを用いた 避難安全対策の有効性評価

7.1 はじめに

都市を直撃する巨大地震時には、同時に発生する複数の延焼火災によって、多くの住民が都市全域の規模で避難行動を開始する事態が予想される。地震火災の危険性から都市住民の安全を確保するには、都市計画や地域防災計画の中で、事前に有効な避難安全対策を考慮しておくことが重要である。

これまでに構築した避難性状予測モデルは、避難者の移動メカニズムを危険度によって明示的にモデル化しているため、多様な安全対策の効果を定量的に評価できることが期待される。この避難モデルを用いて有効な対策を立案するまでのプロセスをまとめると、次のようになる：

- 1) 実態調査の結果から将来的に発生の予想される地震を選定する
- 2) 選定地震の発生に伴う出火条件と気象条件を地域の特性を考慮して決定する
- 3) 延焼モデルと避難モデルを併用した数値シミュレーションを行い、市街地が現時点で保有する問題点を把握する
- 4) 把握した問題点を参考にして目標とすべき避難安全性能の設定を行う
- 5) 問題点に対して対応策を講じた場合、どの程度の安全性能の向上が期待できるのかを延焼・避難シミュレーションによって把握する
- 6) 期待される安全性能が設定した目標を満足するものでなければ、再び作業を繰り返しより適切な対策を見出す

本章では、こうした対策立案プロセスに則って作業を進めることで、有効な避難安全対策を見出すための基礎資料を提示することを目的とする。具体的には、京都市を対象としたケーススタディを行い、現状の市街地が持つ問題点と対策の選択肢の可能性について考

察を加えることに主眼を置く。まず、検討対象となる地震については、京都市周辺に分布する活断層を考え、京都市第三次被害想定[2]の結果を利用しながら出火条件を決定する。次に、決定した出火条件をもとに延焼シミュレーションを行うことで、避難シミュレーションの入力条件として必要な燃焼領域の時間変化を予測する。この計算には、第3章と第4章で構築した火災の拡大モデルを利用する。その後、第5章で検討した住民の避難先選択モデルを避難性状予測モデルに組み込むことで計算を実施し、予測結果を整理する。

7.2 京都市の概要

社寺仏閣といった数多くの文化遺産で名高い京都市は、三方を北山・東山・西山に囲まれた京都盆地に位置する。実態調査から、京都盆地の周辺にはいくつかの活断層が分布していることが明らかになっているが、代表的なものについて、その特徴を整理したものが表7-1、その位置を示したものが図7-1である。これらの活断層は、いずれもマグニチュード7に近い地震を引き起こすものと予想されており、中でも、花折断層がずれた場合の被害は最も大きな規模になるものと考えられている[2]。

平成17年度国勢調査によれば、京都市には約140万人の住民が居住している。これに加えて、多くの文化遺産群が国内外から年間約5000万人（一日平均15万人）もの観光客を誘引している。こうした莫大な数の都市滞留者に対応するため、京都市では67か所のオープンスペースが広域避難場所に指定されており、それらは延焼火災からの輻射熱に対して1ha以上の安全面積を担保している[1]。なお、広域避難場所の配置は図7-1に示してある。

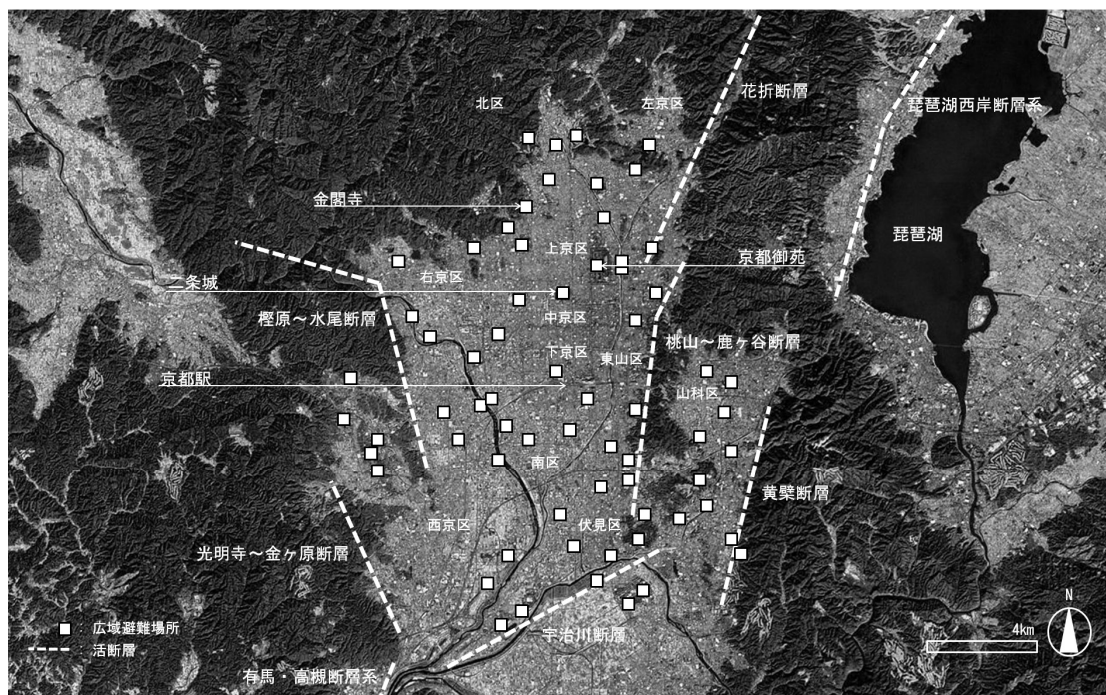
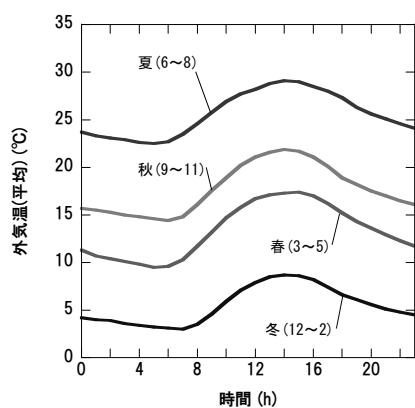


図7-1 京都市周辺の活断層の位置

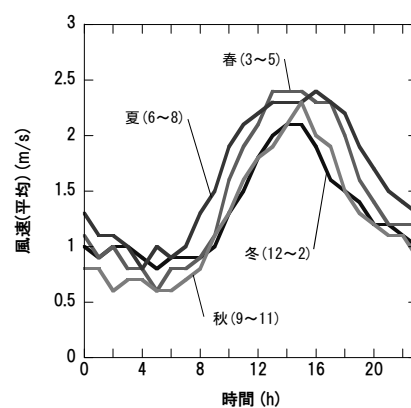
表 7-1 京都市周辺の活断層の特徴と被害予測[2]

起震断層名	花折断層	桃山～鹿ヶ谷断層	宇治川断層	桤原～水尾断層
長さ	47km	11km	10km	15km
幅	16～18km	17km	16.2km	14～14.9km
マグニチュード	7.5	6.6	6.5	6.6
被害建物棟数	274,000	102,000	30,400	47,700
出火件数	26～96	16～59	12～44	11～40

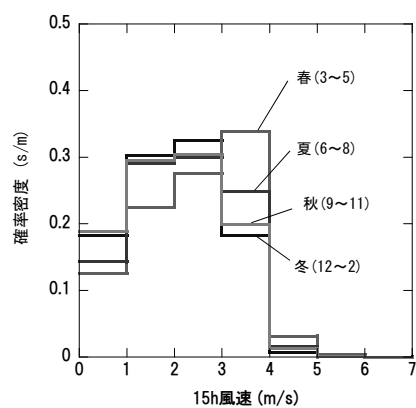
起震断層名	光明寺～金ヶ原断層	有馬・高槻断層系	黄檗断層	琵琶湖西岸断層系
長さ	8km	34km	10km	55km
幅	14.2km	14.1km	16.2km	17.0km
マグニチュード	6.3	7.2	6.5	7.7
被害建物棟数	3,800	32,900	19,600	99,600
出火件数	5～18	9～32	5～17	14～51



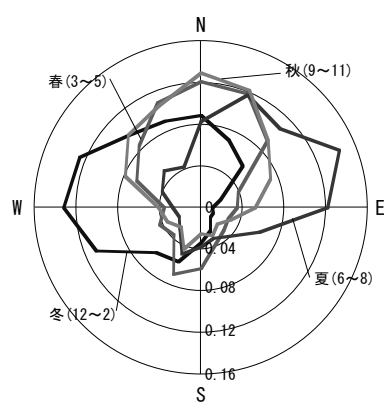
(a) 外気温の平均値の日変動



(b) 風速の平均値の日変動



(c) 15 時における風速の頻度



(d) 風向の頻度

図 7-2 京都市の気象状況[3]

1981～1995 年にかけての京都市における気象状況をまとめたものが図 7-2 である。なお、整理にあたっては、京都地方気象台による観測記録の拡張データ（標準年 Expanded AMeDAS 気象データ）[3]を用いた。ここでは、(a) 1 時間単位の外気温の平均値の日変動、(b) 1 時間単位の風速の平均値の日変動、(c) 15 時における風速の頻度、(d) 1 時間単位の風向の頻度、をそれぞれ季節ごとに示してある。なお、3～5 月を春期、6～8 月を夏期、9～11 月を秋期、12～2 月を冬期とした。年間を通じた外気温の変化は 0～30℃となっており、一日の変動も季節によらず 10℃程度であることが分かる。平均風速は、季節によらず早朝に最小値をとり、その後の外気温の上昇に伴って 15 時前後に最大値をとっている。その後は、外気温の低下に対応するように平均風速も低下している。一日のうちで平均風速が最大となる 15 時に着目すると、風速の頻度分布は季節によらず単峰型をとっており、市街地風速が 4m/s を超える条件は稀なことが分かる。風向の頻度分布は季節によって大きく異なっており、春期や秋期には北の風、夏期には東の風、冬期には西の風の吹く頻度が高いことが分かる。

7.3 京都市住民の避難性状

7.3.1 計算条件

計算を行うにあたって設定した条件を整理したものが表 7-2 である。ここでは、京都市周辺に分布する活断層の中で最も大きな被害をもたらすものと予想される花折断層を起震源に想定し、地震発生から 48 時間が経過するまでの計算を行う。なお、延焼モデル（第 3, 4 章）の計算時間刻みは 30.0sec、避難モデルの計算時間刻み（第 2 章）は 60.0sec と設定した。

(1) 出火条件

避難シミュレーションの入力条件として必要な燃焼領域の時間変化を予測するにあたっては、地震動に伴う出火の条件を決定する必要がある。ここでは、出火条件として次の三つを考慮する。

- 市街地全体での出火件数
- 出火点となる建物
- 建物の出火時間

市街地全体での出火件数を決定するにあたっては、行政区ごとの出火件数を出火率から求め、これを積み上げることで市街地全体の出火件数を算定する手法をとる。行政区の出火件数 n_o は次のように表わされる。

$$n_o = \alpha \cdot n_H \cdot p_o \quad (7-1)$$

ただし、 α は火器使用率、 n_H は行政区の世帯数、 p_o は行政区の出火率である。このうち、火器使用率 α は季節および時間で変化する係数であり、京都市第三次被害想定[2]で利用さ

表 7-2 計算条件

起震源 地震発生時間 計算時間 外気温		花折断層 冬の18時 地震発生から48hrs 20℃	
風速・風向		0m/s	5m/s・W
延焼計算	計算時間刻み	30sec	
	飛び火定数 χ_F	$0.5 \times 10^{-9} \text{ kJ}^{-1}$	
	出火件数	94 (倒壊率の関数でモデル化)	
	出火建物	建物出火率に応じて無作為に設定	
	出火時間	阪神淡路大震災の出火時間の確率密度に応じて無作為に設定	
	建物棟数	417,425	
	建物種別	堅牢・非堅牢	
避難計算	計算時間刻み	60sec	
	重み定数 χ_F	11.0 (m^2/kW)	
	重み定数 χ_P	1.0 (1/m)	
	住民人数	1,243,587 (15歳以上の夜間人口)	
	住民の初期位置	居住町丁目の交差点	
	避難経路ネットワーク	都市計画図(1/2500)の道路網	
	経路の幅員	道路中心線と敷地境界から推定	
	避難場所数	67 (京都市の広域避難場所)	
	避難場所の収容可能人員	∞	
	避難場所の魅力度	第5章の推定値	

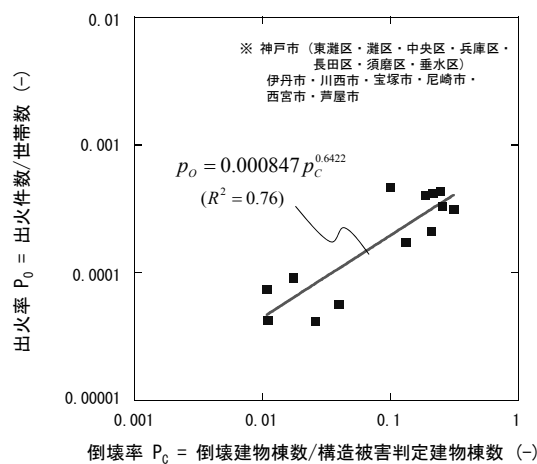


図 7-3 出火率と倒壊率の関係[4,5]

れている値を用いる。行政区の出火率 p_o は、阪神淡路大震災の調査データ[4,5]をもとに行政区の倒壊率 p_c の関数として、次のようにモデル化した (図 7-3)。

$$p_o = 0.000847 p_c^{0.6422} \quad (R^2 = 0.76) \quad (7-2)$$

ただし、 R^2 は決定係数である。本計算では、行政区の倒壊率 p_c に京都市第三次被害想定[2]の結果を利用する。このとき、式(7-2)から計算される行政区の出火率 p_c を整理すれば、表7-3のようになる。出火率 p_o は基本的に 10^{-4} のオーダーであり、東山区や左京区、北区といった花折断層に近い地域で値が大きくなる結果となった。本計算では、地震の発生時間を火器の使用が一年を通して最も多くなる冬期の18時と考える。その結果、市街地全体の出火件数は94件と推定された。

出火点となる建物については、行政区の出火率 p_o を建物一棟の出火率 p_i に換算し、市街地全体の出火件数を建物の出火率 p_i に応じて無作為に配分する。建物一棟の出火率 p_i は次のように表わされる。

$$p_i = \frac{p_o}{n_b} \quad (7-3)$$

ただし、 n_b は行政区の建物数である。

建物の出火時間は、地震後の余震や電力の復旧によって地震発生以降も出火が継続することを考慮し、阪神淡路大震災の調査報告[4]から得られた出火時間の確率密度分布に基づいて無作為に与えるものとする(図7-4)。

飛び火による延焼の発生については、第4章で構築した確率論的モデルを利用することとし、飛び火定数 χ_p に酒田市大火を最も良好に再現する値 0.5×10^{-9} (kJ⁻¹) を採用する。

(2) 気象条件

外気温の日変動は 10^1K のオーダーであるのに対して、火災の拡大や避難者の熱環境を決定する熱気流の温度上昇は 10^2K のオーダー、区画火災時の温度変動は 10^3K であることから、外気温の変動が計算結果に与える影響は小さいものと考えられる。そこで、外気温は 20°C として一定値をとるものとした。

市街地風については、冬期に頻繁に観測される西の風が時間的に変動することなく吹い

表 7-3 出火率の計算値

No.	行政区	建物棟数 (-)	倒壊建物数 (-)	倒壊率 (-)	出火率 (10^{-4})
1	北区	61,634	4,400	0.071	1.55
2	上京区	50,932	1,900	0.037	1.02
3	左京区	80,607	6,300	0.078	1.65
4	中京区	58,064	1,700	0.029	0.88
5	東山区	23,618	2,800	0.119	2.15
6	下京区	41,722	2,200	0.053	1.28
7	南区	51,994	2,200	0.042	1.11
8	右京区	92,027	200	0.002	0.17
9	伏見区	118,380	6,600	0.056	1.33
10	山科区	60,481	1,400	0.023	0.75
11	西京区	58,927	0	0	0

ているものとし，風速の大小による避難性状の変化を把握することを目的として，これを 0.0, 5.0m/s の二通りに変化させた．

(3) 建物条件

延焼計算の対象となる建物数は 417,425 棟であり，その形状，階数，構造に関する情報は，都市計画図および航空測量をもとに作成した．ただし，建物の構造形式は堅牢，非堅牢の二種類に分類し，それぞれの建物構造の燃焼特性は表 7-4 のように設定した[6]．外壁面に付随する開口部の大きさについては，壁面積に対する比率 η を建物の隣棟間隔 r を用いて次のようにモデル化した．

$$\eta = \begin{cases} 0.02 & (r < 4.0) \\ 0.3 & (4.0 \leq r < 7.2) \\ 0.35 & (7.2 \leq r) \end{cases} \quad (7-4)$$

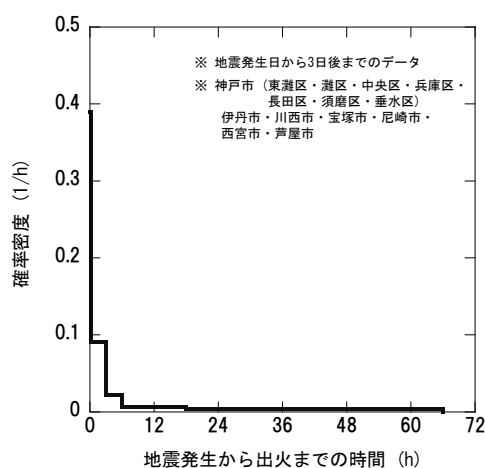


図 7-4 出火時間の確率密度分布[4]

表 7-4 設定した熱物性値[6]

		非堅牢	堅牢
収納可燃物密度		30 (kg/m ²)	30 (kg/m ²)
固定可燃物密度		60 (kg/m ²)	0 (kg/m ²)
固定可燃物の初期露出表面積比		0.1	0
壁	厚み	18 (mm)	
	熱伝導率	1.51×10^{-3} (kW/mK)	
	輻射吸収率	1	
	対流熱伝達率	0.01 (kW/m ² K)	
	比重	2200 (kg/m ³)	
	比熱	0.9 (kJ/kgK)	
	燃え抜け時間	30 (min)	燃え抜けなし
燃え抜け潜熱		5000 (kJ/kg)	なし

ただし、開口部の高さは一様に 1.5m とした。なお、複数階から成る建物には階段といった上下階をつなぐ堅穴部が存在することになるが、ここでは、その大きさを一様に 3.0m² として計算を行った。

(4) 避難条件

避難計算の対象となる住民の人数は、京都市 5,202 町丁目に居住する 15 歳以上の男女 1,243,587 人とし、それぞれの町丁目の年齢別人口は平成 17 年国勢調査年齢 5 歳階級別人口に基づいて設定した。本計算で想定する地震の発生時間は冬期の 18 時であるが、この時間帯の人口分布に関する詳細な資料は存在しない。そこで、住民の初期位置は居住する町丁目の交差点で代表させ、無作為に配置することとした。

避難経路となる道路ネットワークは都市計画図 (1/2500 縮尺) から読み取り、その幅員は道路中心線と敷地境界との距離から推定した。避難場所については、京都市地域防災計画[1]の中で指定されている 67 か所の広域避難場所を設定し、その収容可能人数については制限を設けないものとした。避難者の目的地となる広域避難場所は、第 5 章で構築した避難先選択モデルを用いて判定することとし、それに必要な広域避難場所の魅力度も、第 5 章で推定した値を用いる。また、住民の在住期間は第 5 章で整理した年齢別の確率密度分布に基づいて無作為に設定するものとし、避難を妨げる地理的な隙間については、市街地を分断する河川、軌道、山岳のうち 40m 以上の幅を有するものを設定した。

避難ポテンシャル Φ_o を決定する定数 χ_F, χ_P は、第 6 章において調整した関東大震災の被災状況を最も良好に再現する値 ($\chi_F = 11.0, \chi_P = 1.0$) を用いた。

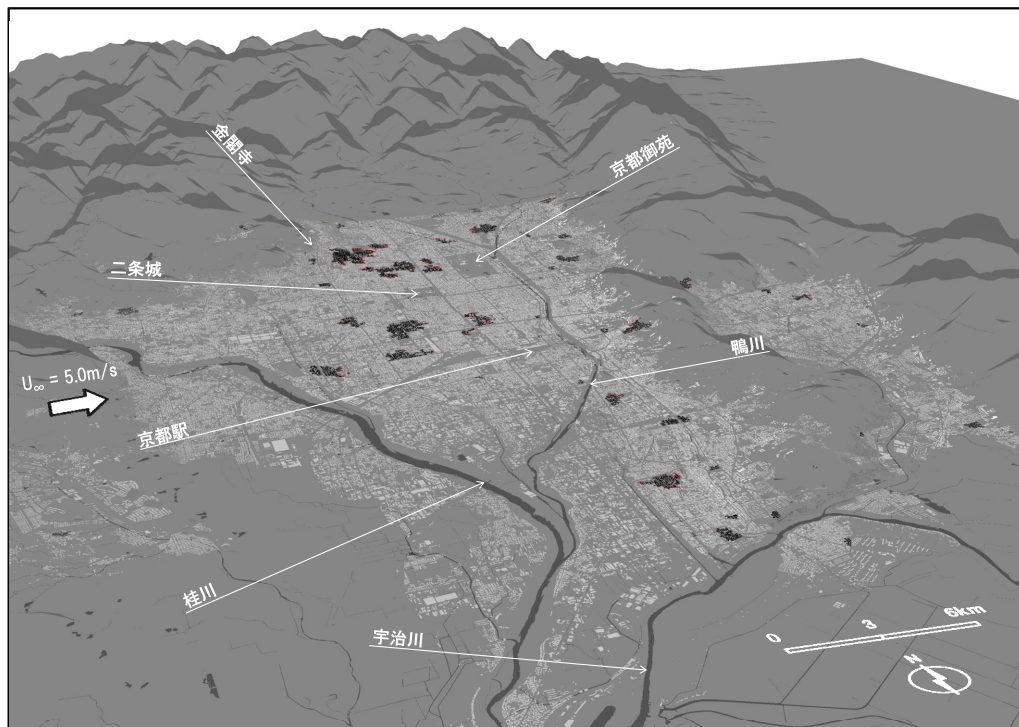
7.3.2 計算結果とその考察

(1) 延焼性状

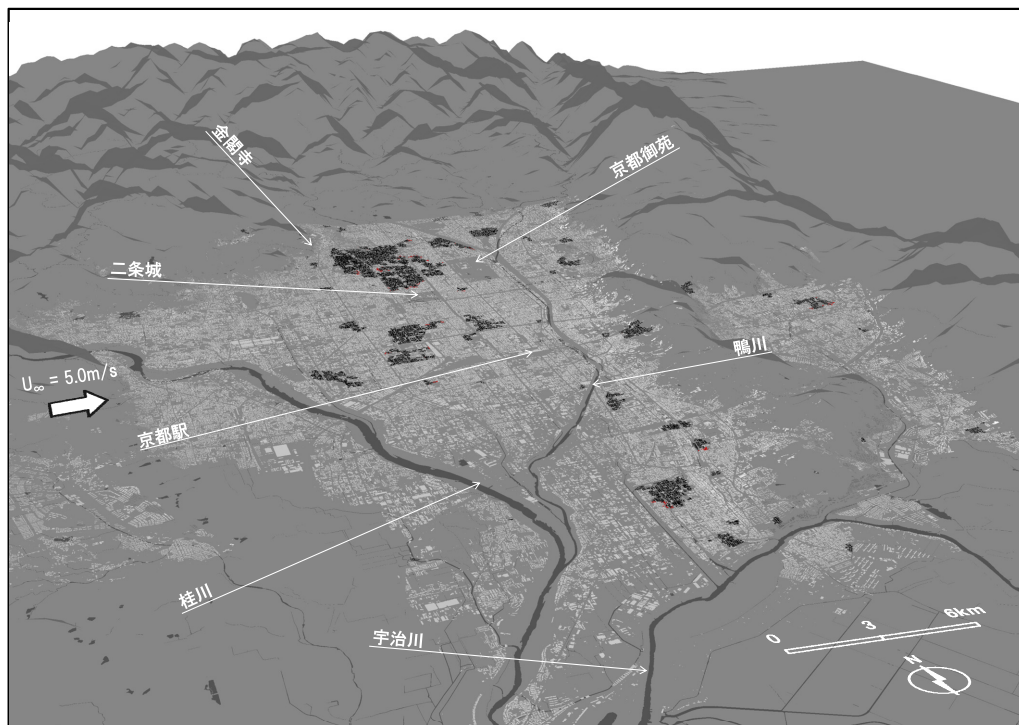
図 7-5 は、延焼モデルによって計算された風速 5m/s の条件の延焼火災の様子を示したものである。ここでは、地震発生から 12 時間後と 24 時間後の様子を示してあり、赤い部分が燃焼中の建物に、黒い部分が焼失した建物に相当する。図から、京都市の広い範囲で出火が発生し、それらが隣棟建物へ燃え移ることで燃焼領域を拡大していった様子が分かる。延焼火災の進行方向は基本的に風下側が支配的であり、市街地風に流された熱気流や火の粉の影響を受けているものと考えられる。

地震発生から 48 時間後までの燃焼性状の推移を示したものが図 7-6 である。市街地では地震の発生と同時に 41 件の火災が発生し、その後も断続的ではあるが出火が継続したことが分かる。延焼火災の勢力は風速によらず地震発生から 18 時間後までの間で強く、それ以降は衰える結果となった。風速 5m/s の条件での飛び火の発生数は全体で 378 件と計算されたが、そのうちの多くは延焼火災の勢力が強かった時間帯に集中している。市街地全体での最終的な焼失建物数は風速 0m/s の条件で 32,828 棟、風速 5m/s の条件で 43,222 棟と計算された。

地震発生から 48 時間後の市街地の様子を比較したものが図 7-7 である。ここでは、○印が出火点の位置を、赤い部分が燃焼中の建物を、黒い部分が焼失した建物を示している。



(a) 地震発生から 12 時間後



(b) 地震発生から 24 時間後

図 7-5 延焼火災の予測結果 (風速 5m/s)

基本的に、出火点の多くは花折断層に近い地域に集中しており、倒壊率の小さい京都市の西部では出火が少なくなる結果となった。出火点から発生した火災の多くは自ら鎮火もしくは数棟規模の延焼で鎮火し、大規模な延焼火災へと発展したものは一部であることが分かる。大規模化した火災も基本的には大通りや河川といったオープンスペースで焼け止ま

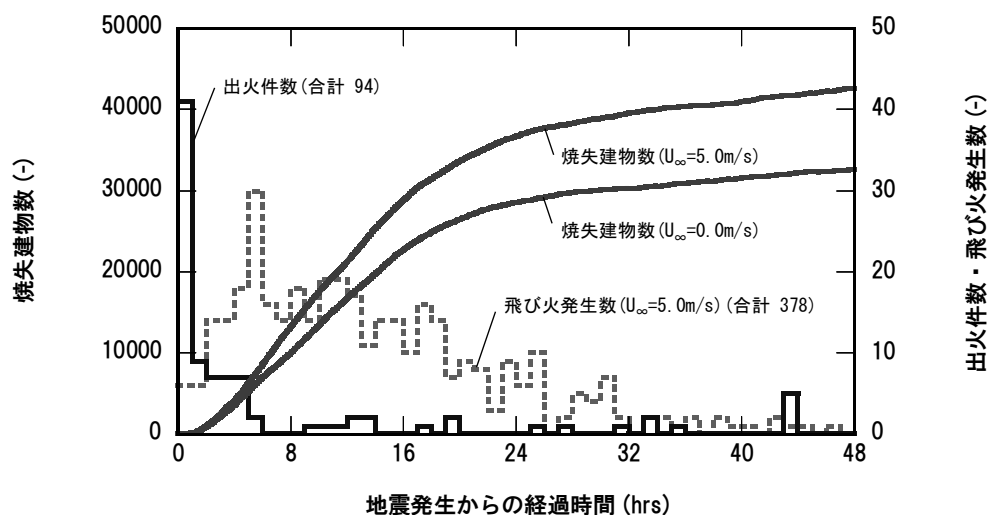


図 7-6 燃焼性状の推移

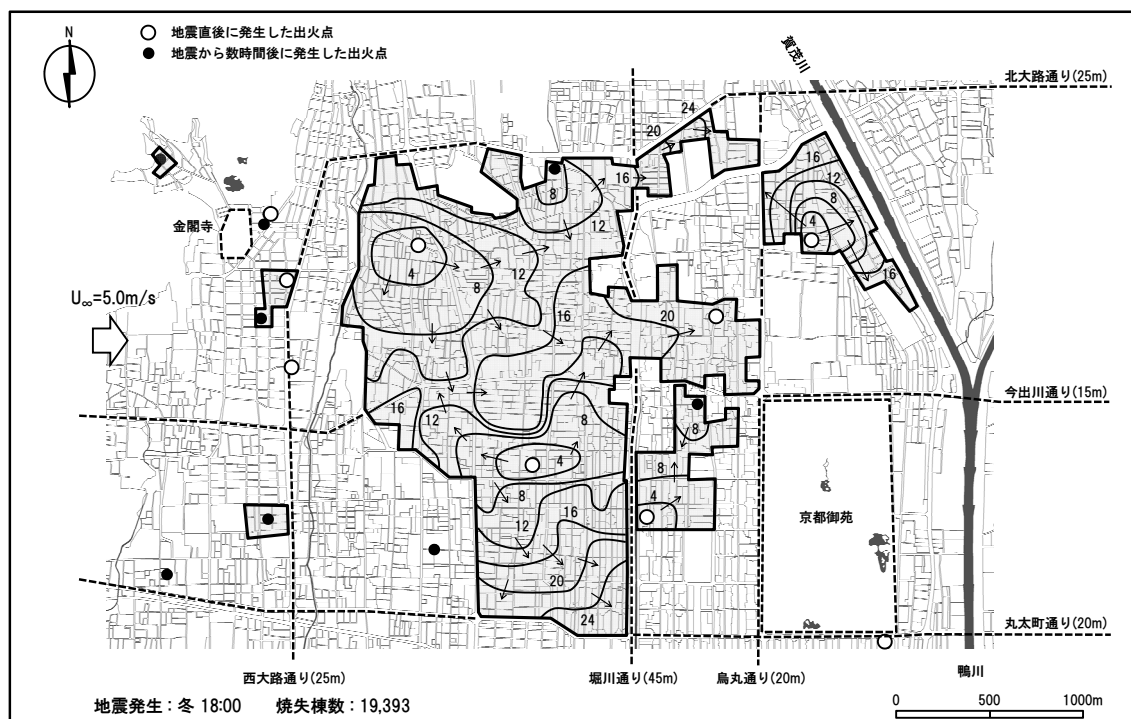
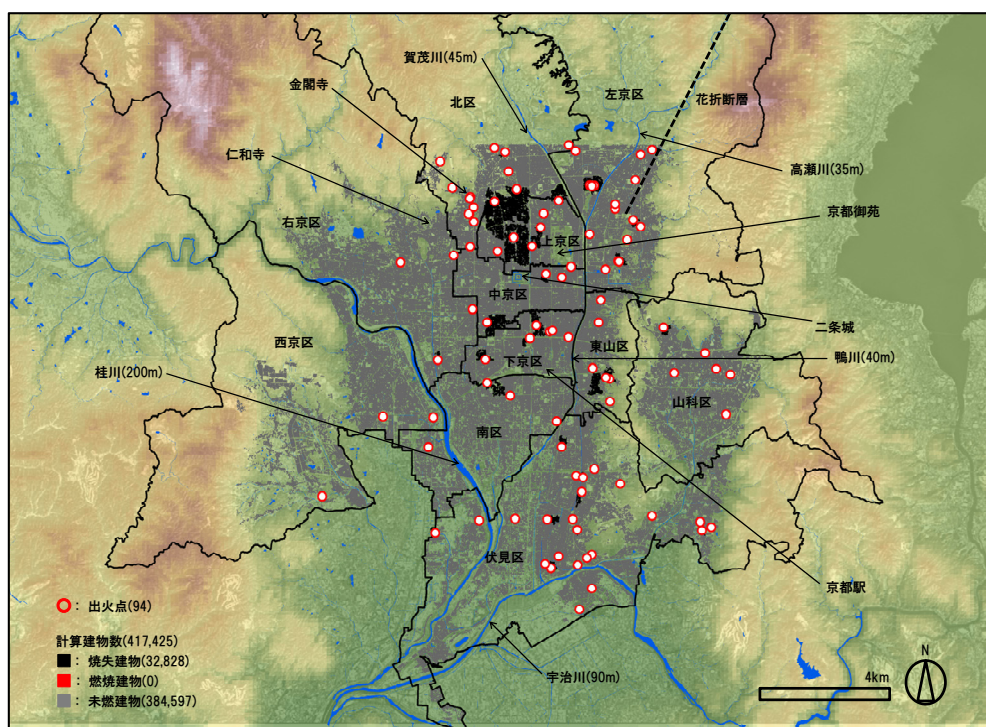
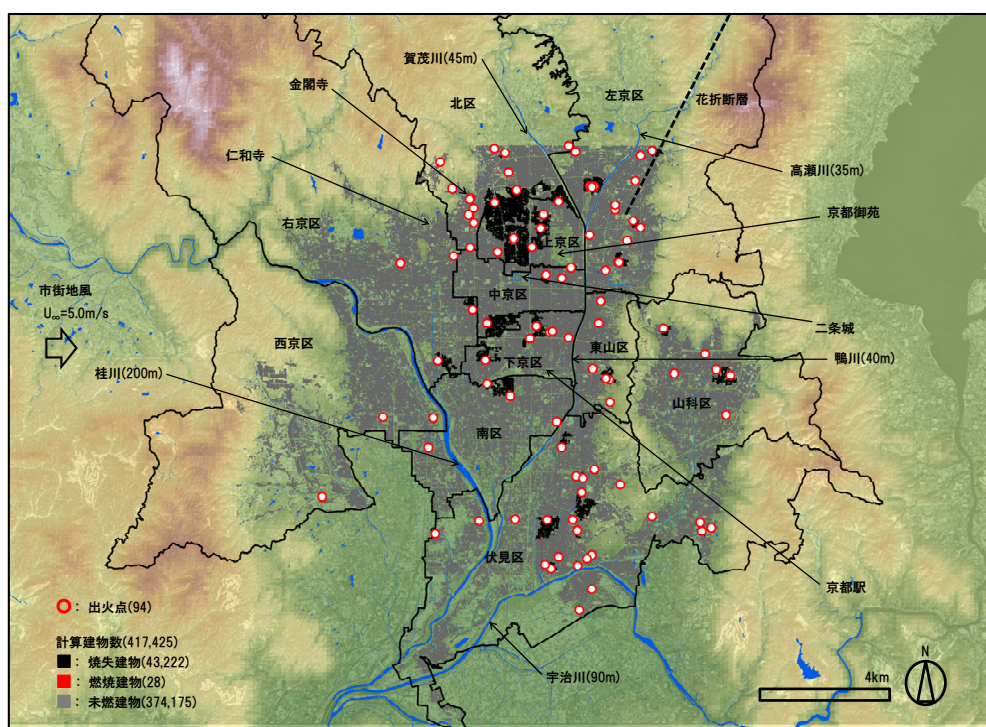


図 7-8 上京区の火災前線の移動の様子 (風速 5m/s)



(a) 風速 0m/s



(b) 風速 5m/s

図 7-7 計算終了時点の市街地の様子

っており、格子状に走る広幅員の道路が防火区画の役割を果たしていることが伺える。ただし、上京区の西部では火災による焼失被害が風速によらず著しい結果となった。風速 5m/s の条件について、上京区での火災前線の移動の様子を示したものが図 7-8 である。ここでは、火災前線的位置を実線で、地震直後に発生した出火点の位置を○印で、地震から数時間後に発生した出火点の位置を●印で示してある。また、実線に付随する数字は、火災前線がその位置に来た時点の地震発生からの経過時間 (h) を表わしている。この地域では、地震直後に発生したいくつかの火災が大規模化し、鎮火までの約 24 時間で 19,393 棟の建物が焼き尽くされた。火災前線の進行方向は市街地風に対応して風下側に大きく、北は北大路通り (幅員 25m)、南は丸太町通り (幅員 20m) で焼け止まったものの、南北に走る堀川通り (幅員 45m) を飛び越えて東側へ拡大した。この地域では、多数の木造建物が特に密集して建っており、大通りへ抜ける路地も非常に狭いことが、火災被害の大規模化に繋がったものと考えられる。

(2) 避難性状

図 7-9 は、避難モデルによって計算された地震発生から 48 時間後の最終的な避難状態を比較したものである。最終的に避難を開始した人数は風速 0m/s の条件で 89,475 人、風速 5m/s の条件で 177,041 人と計算され、京都市人口の 10% 前後が身の危険を感じたことが分かる。この避難を開始した人数は、市街地風速の増加によって二倍程度に膨れ上がっている。このことは、より広い範囲が火災に巻き込まれたことにもよるが、加えて、熱気流が市街地風に流された分、危険の及ぶ範囲が増加したことにも影響を受けている。避難場所に到着した住民や依然避難中である住民は、風速によらず避難を開始した人数の概ね半分を分け合っている。このうち避難中である住民の多くは、広域避難場所の存在を知らず市街地をさ迷いながらも、延焼火災の影響が及ばない安全な地点へ移動することで難を逃れることができた避難者である。

延焼火災からの高温気体に曝され避難場所に辿り着く前に避難不能となった住民は、風速 0m/s の条件で 54 人、風速 5m/s の条件で 1,650 人と計算された。図 7-10 はこのような

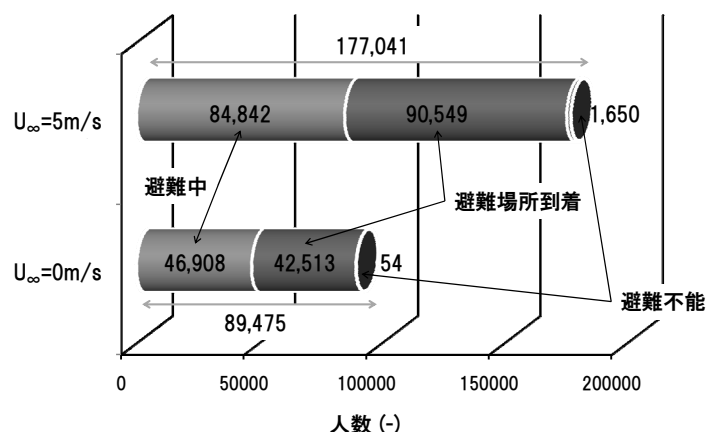
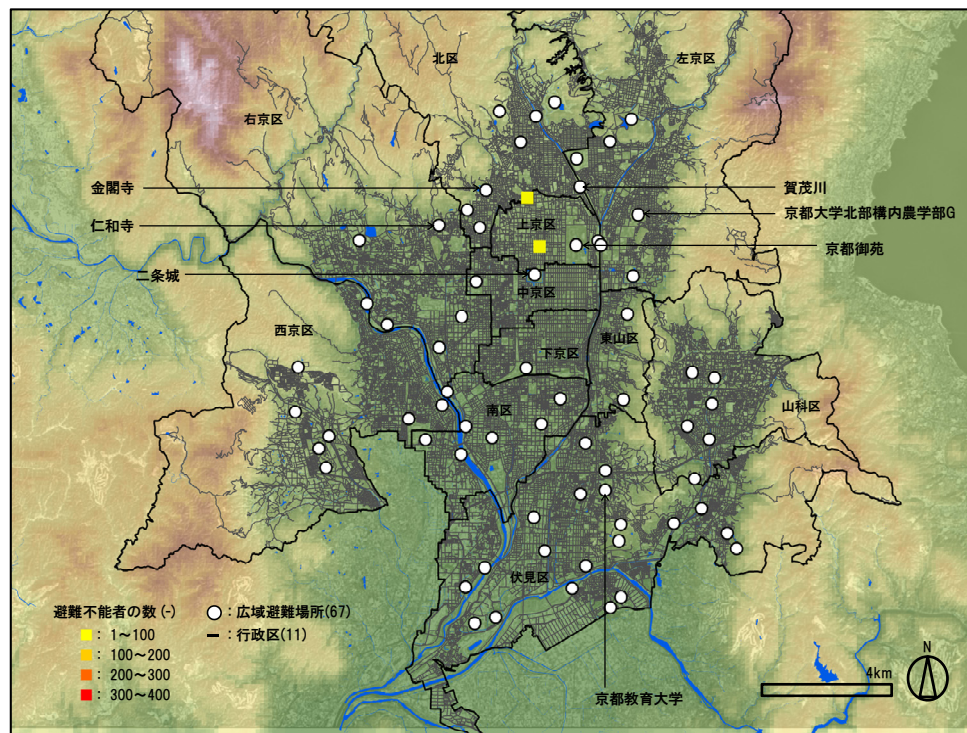
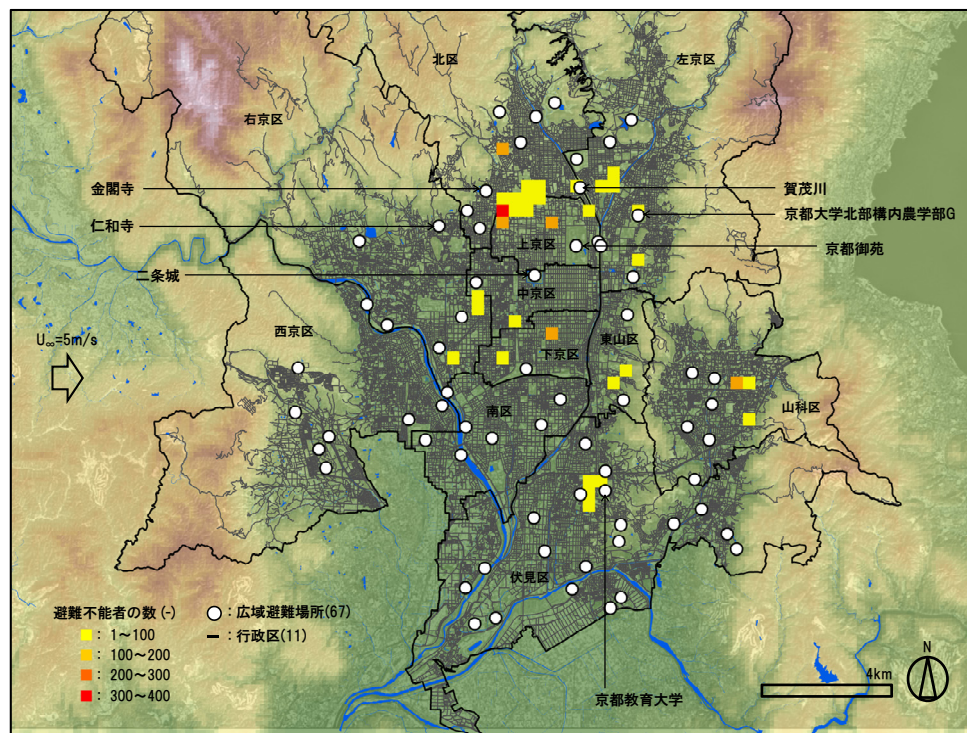


図 7-9 最終的な避難状態の比較



(a) 風速 0m/s



(b) 風速 5m/s

図 7-10 避難不能者の発生箇所

避難不能者の発生箇所を比較したものである。ここでは、避難不能者の発生数を幅 400m の正方形メッシュを単位として色分けで示してある。図から、市街地風の有無によって避難不能者の発生数が大きく変化するとともに、その発生箇所も広域化していることが分かる。こうした変化は、市街地風によって熱気流が吹き倒され、その結果避難者の曝される温度環境が厳しくなることに起因するものと考えられる。ただし、避難不能者の多くは市街地風の有無によらず上京区の西部に集中している。このことは、都市構造上、広域避難に支障が生じやすい地域と、そうでない地域が存在することを示唆している。

図 7-11 は、風速 5m/s の条件について、避難先の候補に考えられた広域避難場所の数を避難不能者と生存者と比較したものである。避難不能者、生存者にかかわらず、多くの住民が明確な避難目標を持たずに避難を開始したことが分かる。避難目標を持たない住民のうち最終的に生き残ることができた避難者は、避難目標を持った周囲の避難者に追従して広域避難場所へ避難したり、市街地をさ迷いながらも延焼火災の影響が及ばない安全な地点へ移動することで難を逃れたものと考えられる。しかし、避難不能者の約 7 割がこういった避難目標を持たない避難者であることに注意すると、広域避難場所といった避難目標の有無は避難の成否をある程度左右する重要な要素であると考えられる。

表 7-5 は、風速 5m/s の条件について、広域避難場所の到着人数とその収容可能人員に対する割合（収容率）を整理したものである。本計算で検討した条件に限っては、京都市の広域避難場所の全てが最低限の収容可能人員を担保していることが伺える。最も多くの避難者が流入した広域避難場所は京都御苑であり、16,377 人の住民が避難する結果となった。このことは、京都御苑の風上側で大規模な延焼火災が発生したことにもよるが、京都御苑の避難空間としての魅力度が高いことにも影響を受けているものと考えられる（第 5 章）。なお、京都御苑は避難に利用可能なスペースが約 34ha と広大であるため、収容状況には十分余裕がある。一方、収容率の最も大きな広域避難場所は金閣寺と計算され、その収容率は 7 割程度である。本計算で検討した条件は、強風が西から東（金閣寺方向から京都御苑方向、図 7-8 参照）に向かって吹く場合であるが、仮に強風が逆方向に向かって吹く場合には、風下側に位置する金閣寺では避難者を十分に収容できない可能性が懸念される。

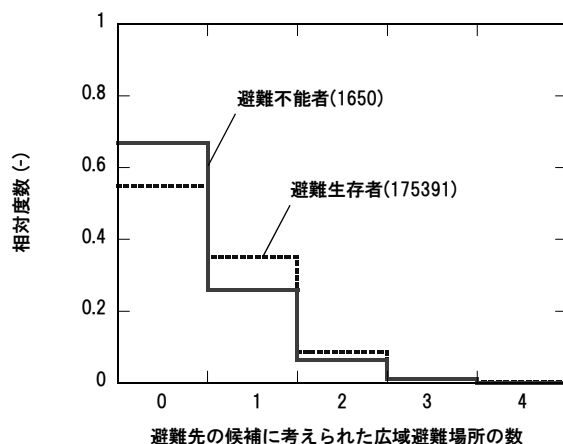


図 7-11 避難先の候補に考えられた広域避難場所の数の比較

表 7-5 広域避難場所の収容率一覧（風速 5m/s）

No.	行政区	広域避難場所名称	分類	収容可能人員 (-)	到着人数 (-)	収容率 (-)
1	北区	京都ゴルフ場舟山コース(西賀茂)	その他	195,000	167	0.0009
2		大宮交通公園	公園	6,000	1,453	0.2422
3		金閣寺境内	歴史的空間	5,000	3,623	0.7246
4		立命館大学衣笠グラウンド	学校	9,000	1,478	0.1642
5		洛星高校グラウンド	学校	7,500	282	0.0376
6		京都ゴルフ場上賀茂コース	その他	195,000	4	0.0000
7	上京区	京都御苑	歴史的空間	173,500	16,377	0.0944
8	左京区	府立植物園・府立大学グラウンド	その他	140,000	759	0.0054
9		宝が池公園	公園	70,000	368	0.0053
10		京都大学北部構内農学部グラウンド	学校	21,500	4,457	0.2073
11		岡崎公園	公園	22,500	1,186	0.0527
12	中京区	宝が池公園スポーツ広場	公園	28,200	631	0.0224
13		二条城	歴史的空間	35,000	10,798	0.3085
14		島津製作所三条工場北グラウンド	その他	13,750	1,154	0.0839
15	東山区	日吉ヶ丘高校グラウンド・月輪中学校グラウンド・泉涌寺境内	学校	23,500	792	0.0337
16	下京区	梅小路公園	公園	50,000	8,472	0.1694
17	南区	殿田公園・陶化中学校グラウンド	公園	8,250	371	0.0450
18		上鳥羽公園(グラウンド)	公園	8,500	238	0.0280
19		吉祥院公園(グラウンド)・桂川左岸久世橋上流	公園	39,000	466	0.0119
20		塔南高校グラウンド	学校	5,000	282	0.0564
21		陸上自衛隊桂駐とん地	その他	5,000	16	0.0032
22		久世橋西詰公園	公園	15,500	90	0.0058
23		仁和寺境内	歴史的空間	6,500	143	0.0220
24	右京区	西京極総合運動公園	公園	36,000	4,125	0.1146
25		西院公園・デルタ自動車四条教習所	公園	11,250	960	0.0853
26		広沢の池付近・仏教大学グラウンド・堀川高校グラウンド	学校	90,000	1	0.0000
27		京都警察学校グラウンド・龍谷大学構内	学校	15,000	3,657	0.2438
28	伏見区	京都教育大学附属高校・消防学校グラウンド	学校	27,000	1,655	0.0613
29		京都教育大学構内	学校	26,250	3,033	0.1155
30		桃山御陵・伏見桃山城運動公園	その他	108,500	2,825	0.0260
31		伏見公園(グラウンド)	公園	9,500	2,195	0.2311
32		下鳥羽公園	公園	9,500	498	0.0524
33		三栖公園	公園	11,000	1,276	0.1160
34		小栗栖中学校グラウンド・小栗栖小学校グラウンド	学校	6,400	644	0.1006
35		栗陵中学校グラウンド・池田小学校グラウンド	学校	5,600	29	0.0052
36		春日丘中学校グラウンド・日野小学校グラウンド	学校	6,250	1,045	0.1672
37		日野野外活動施設	その他	7,850	1	0.0001
38		向島南小学校グラウンド・宇治川公園	学校	27,950	151	0.0054
39		向島中学校グラウンド・向島二の丸小学校グラウンド	学校	10,450	90	0.0086
40		向島藤の木小学校グラウンド・向島東公園	学校	24,350	515	0.0211
41		伏見北堀公園	公園	18,650	848	0.0455
42		羽東師運動広場	公園	13,850	39	0.0028
43		京都府警察自動車運転免許試験場	その他	27,550	5	0.0002
44		横大路運動公園	公園	64,000	4	0.0001
45		京都競馬場(駐車場)	その他	60,500	0	0.0000
46	山科区	聖母女学院短期大学・深草中学校グラウンド	学校	7,500	629	0.0839
47		山科中央公園・安祥寺中学校グラウンド・山階小学校グラウンド	公園	10,050	1,745	0.1736
48		東山中・高等学校グラウンド	学校	6,650	47	0.0071
49		東野公園・山科中学校グラウンド	公園	19,400	276	0.0142
50		洛東自動車教習所	その他	8,100	3	0.0004
51		龍谷大学グラウンド	学校	26,800	6	0.0002
52		勤修寺公園・勤修中学校グラウンド	公園	19,000	67	0.0035
53	西京区	桂高等学校グラウンド	学校	9,000	49	0.0054
54		桂川中学校グラウンド・川岡東小学校グラウンド・牛ヶ瀬公園	学校	11,950	7	0.0006
55		小畑川中央公園	公園	44,850	1	0.0000
56		境谷小学校グラウンド・洛西中学校グラウンド・境谷公園	学校	13,000	0	0.0000
57		竹の里小学校グラウンド・大蛇ヶ池公園	学校	11,150	0	0.0000
58		桂坂小学校グラウンド・大枝中学校グラウンド・国際日本文化研究センター	学校	29,000	0	0.0000
59		市立芸術大学	学校	17,100	1	0.0001
60	—	賀茂川右岸(御園橋より上流)	河川	11,250	238	0.0212
61	—	賀茂川右岸(上賀茂橋～菱橋)	河川	20,000	7,446	0.3723
62	—	鴨川右岸(賀茂大橋～丸太町橋)	河川	15,500	223	0.0144
63	—	鴨川左岸(賀茂大橋～丸太町橋)	河川	13,500	1,407	0.1042
64	—	円山公園(将軍塚周域)	公園	39,300	146	0.0037
65	—	桂川左岸(桂大橋～東海道線)	河川	40,000	1,010	0.0253
66	—	桂川左岸(松尾橋～上野橋)	河川	31,500	47	0.0015
67	—	桂川右岸(嵐山公園～松尾橋～上野橋)	河川	68,500	1	0.0000

※ 広域避難場所の分類は、「学校」・「公園」・「河川」・「歴史的空間」の4つに分類し、これらに当てはまらないものは、「その他」とした。

7.4 避難安全対策とその効果

7.4.1 対策の選択肢

地震火災による避難上の被害を抑止するには、一般的に、

- ・ 消火設備の設置などによる消防力の向上
- ・ 防火区画内の老朽建築物の建て替え・補修などによる建築物の難燃化・緩燃化
- ・ 道路の拡幅，空き地の確保などによる延焼遮断帯の形成

といった火災そのものの勢力を軽減するための対策と、

- ・ 既存空き地の利用，周辺建物の不燃化などによる避難空き地の確保
- ・ 道路の拡幅，沿道建物の不燃化などによる避難経路の確保
- ・ 避難勧告・指示の発令などによる避難開始の早期化
- ・ 避難先の指定などによる避難者の誘導

といった避難を円滑に進めるための対策が採られる。

ただし，市街地構造の改変といった都市計画的対策は，それにかかる莫大な費用，住民の経済的な制約，土地・建物に対する強い権限によって，急速な改善を期待することは難しい．ここでは，市街地構造の改変が進みにくい現状を踏まえ，次のような人的対策を火災発生後に応急的に講じることで，避難安全性の向上を図ることを考える：

- 1) 避難勧告・指示の発令によって，避難時間に余裕を持たせる
- 2) 発令に伴う避難先の指示によって，安全な場所への避難を促す

こうした対策によって，輻射熱や煙といった危険因子に避難者が曝される程度は軽減され，延焼火災の危険が及ばない安全な地点へ円滑に避難することが可能になるものと考えられる。

ここでは，これまでの計算で避難不能者の発生が集中した上京区西部に着目し，対策実施前後の避難不能者の発生数を比較することで，その効果を定量的に評価する．対策を実施する地域は北大路通り・堀川通り・今出川通り・西大路通りに囲まれた地域とし，ここには 27,701 人の住民が居住している（図 7-12）．なお，市街地風は西から風速 5m/s の風が

表 7-6 対策の実施条件

計算条件		最遅避難開始時間 (地震発生からの経過時間)	避難先の指示
A	1	0.5 h	なし
	2	1 h	
	3	2 h	
	4	3 h	
B	1	0.5 h	京都御苑
	2	1 h	
	3	2 h	
	4	3 h	

吹いている条件を考える。

火災の発生後、避難勧告・指示の発令が円滑に実施されるかどうかや、住民がそれによって避難を開始するかどうかは定かではない。ここでは、避難の開始を早期化する何らかの対策が施され、表 7-6 に示す時間（最遅避難開始時間）には、住民は確実に避難を開始しているものと仮定して計算を行う。すなわち、住民が避難を開始する地震発生からの経過時間 t_E は、次のように表わされる。

$$t_E = \min(t_F, t_I) \quad (7-5)$$

ただし、 t_F は火災からの影響によって避難の開始を判断する時間（式 (2-23)）、 t_I は避難勧告・指示によって達成される避難の開始時間（表 7-6）である。また、住民が避難先を指示された場合には、心理危険度ポテンシャル Φ_p をその避難先を境界条件として計算することで、指定された広域避難場所への移動を表現する（式 (2-20)）。なお、避難先の指示を受けない場合は、第 5 章で構築した避難先選択モデルを用いて、目的地となる広域避難場所を判定する。ここでは、収容可能人員に十分な余裕があり、当該地域の風下側に位置する京都御苑を避難者の誘導先として設定する（表 7-6）。

7.4.2 対策の効果

市街地全体での避難不能者の発生数を対策ごとにプロットしたものが図 7-13 である。避

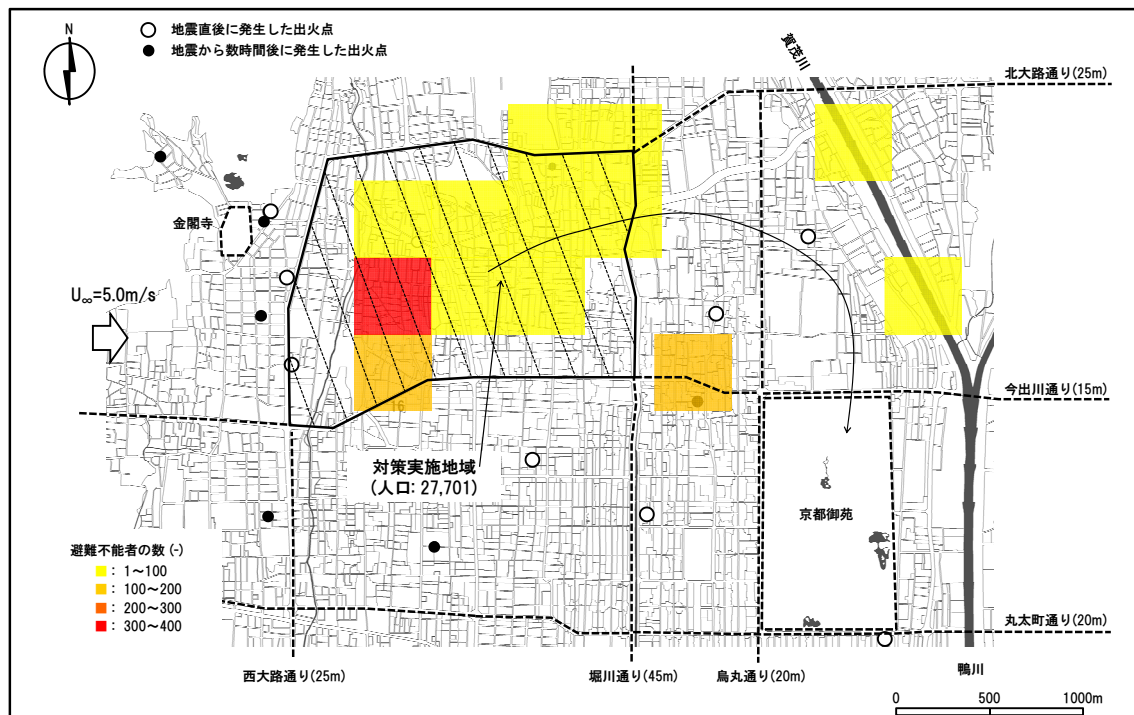


図 7-12 対策の実施地域

難の開始を早期化した条件(●印)を見ると、避難不能者の発生数は対策を講じる前の1,650人に比べて低減しており、対策の効果が表れている。このことは、延焼火災の接近前にある程度余裕を持って避難を開始することで、煙に曝露される度合いが抑えられたことによるものと考えられる。対策の効果は地震発生から短時間で実施できるほど大きくなり、条件(A-1)で574人の避難不能者が軽減された。ただし、条件(A-4)では避難不能者の発生数が1,587人と計算され、対策前と比べた変化は少ない。このことから、避難勧告・指示の発令といった対策が十分な効果を発揮するには、遅くとも地震発生から3時間以内に実施

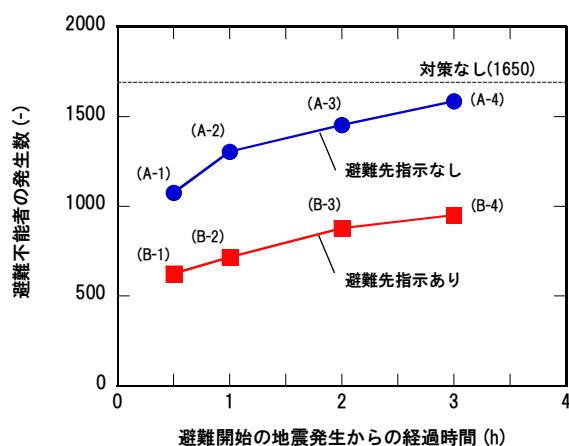


図 7-13 対策ごとの避難不能者の発生数

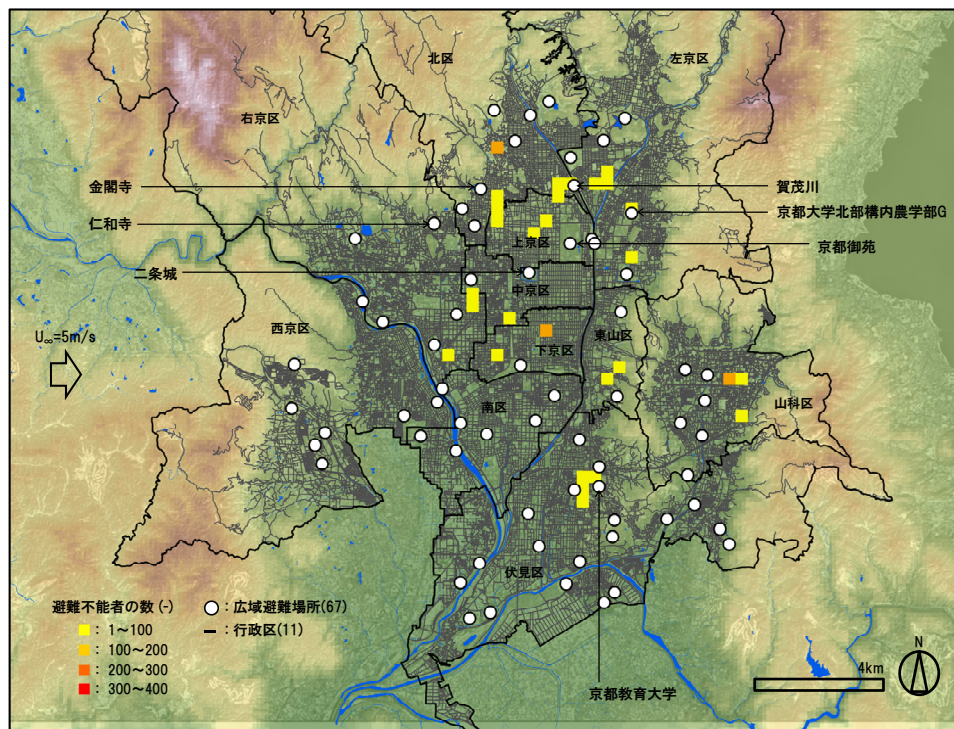


図 7-14 避難不能者の発生箇所 (対策 B-1)

される必要があると考えられる。

一方、発令に伴って避難先を指示した条件（■印）を見ると、避難不能者の発生数は対策を講じる前に比べて大幅に減少しており、対策の効果が大きいことが分かる。これは、広域避難場所の存在を知らない住民に避難先を指示することで、市街地をさ迷ううちに高温気体の曝露量が致死量を超えるといった状況を抑止できたことによるものと考えられる。条件（B-1）で計算された避難不能者の発生箇所を示したものが図 7-14 である。対策を実施した上京区西部の辺りでは、避難不能者の発生数が対策実施前（図 7-10.b）に比べて大きく減少しており、対策の効果が見て取れる。しかし、対策を地震発生から比較的短時間で実施できた条件にもかかわらず、この地域の避難上の被害を完全に抑えることはできなかった。このことは、火災発生後の応急的な対策にはその効果に限界があることを意味しており、市街地の難燃化や道路の拡幅といった都市構造に対する予防的な対策の必要性を示唆している。

7.5 まとめ

本章では、京都市において将来的に発生の予想される地震火災を想定し、避難シミュレーションを行うことで、避難安全対策の有効性評価を行った。避難シミュレーションにあたっては、入力条件として必要な燃焼領域の時間変化を延焼シミュレーションによって予測し、広域避難場所の魅力度の偏りを考慮して住民避難の全体像を把握した。その後、避難上の被害を抑制するためのいくつかの対策の中から、避難開始の早期化や避難先の指示といった火災発生後の応急的な対策を選択し、その効果を避難不能者の発生数の点から定量化した。

本章で検討した対策は、経済的・制度的制約によって都市構造的対策が進みにくい現状を考え、火災発生後に応急的に実施することで避難上の被害を軽減しようとするものである。本計算では、こういった対策の具体的な実現方法を検討しなかったが、避難の開始を早めると同時に避難先を指示することで、避難不能者の発生数が大幅に低減する結果が得られた。こうした結果から、本モデルが避難安全対策の有効性を定量的に評価可能であり、効果的な対策を立案するためのツールとして利用可能であることが示された。本章では、有効性評価の対象となる対策を火災発生後の応急対策に限定したが、建築物の難燃化や道路の拡幅といった都市構造的対策についても、延焼シミュレーションを併用する本手法を用いれば評価可能である。

参考文献

- [1] 京都市防災会議: 京都市地域防災計画 震災対策編, 京都市消防局防災対策室防災課, 2010.1
- [2] 京都市: 京都市第3次地震被害想定 報告書, 2003.10
- [3] 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ, 丸善, 2000.1
- [4] 日本火災学会: 1995年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書, 1996
- [5] 建設省建築研究所: 平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書, 1996
- [6] 日本建築学会編: 建築設計資料集成1環境, 丸善, p.119, 1978.6

第 8 章

総括

8.1 本研究の成果

本研究では、多様な避難安全対策の効果を合理的に評価することを目的として、地震火災時における住民の都市避難をポテンシャルの概念に基づいてモデル化した。この避難モデルでは、水が高い所から低い所に向かって流れるように、危険度の高い所から低い所に向かって住民の避難が行われるものと考えた。この危険度を決定する要因として、(1) 燃焼建物からの輻射と熱気流、(2) 市街地の避難場所、の二つを考え、それぞれによる影響を (I) 火災危険度ポテンシャル、(II) 心理危険度ポテンシャル、として個別に評価した後合成することで、避難経路となる道路ネットワークの総合的な危険性を評価することとした。このとき、避難モデルは、(A) 火災危険度ポテンシャル評価モデル、(B) 心理危険度ポテンシャル評価モデル、(C) 避難者の行動モデル、の三つのサブモデルから構成される (第 2 章)。火災危険度ポテンシャルの評価に必要な燃焼領域の時間変化については、既往の市街地火災の物理的延焼モデルを拡張することで、都市規模の計算に利用可能なモデルへと改良した。このモデルでは、建物間の火災拡大要因に、燃焼建物からの輻射・熱気流 (第 3 章) と、火の粉の飛散 (第 4 章) を考え、個々のモデルを酒田市大火との比較を行うことで検証した。また、心理危険度ポテンシャルの評価に必要な住民の避難先については、その決定構造を避難場所の魅力度を考慮してモデル化し、ヒアリング調査の結果から検証した (第 5 章)。基幹となる避難モデルの妥当性については、関東大震災における住民避難シミュレーションを実施し、計算結果を被災調査報告と比較することで検討を加えた (第 6 章)。また、京都市を対象としたケーススタディを行い、避難安全対策の実施効果を避難シミュレーションを用いて定量的に評価した (第 7 章)。

第 2 章 ポテンシャルの概念に基づく避難性状予測モデル

第 2 章では、避難性状予測モデルを構成する三つのサブモデルの定式化を行った。

まず、火災危険度ポテンシャル評価モデルでは、避難者が曝される熱環境の厳しさを決定する要因として燃焼建物からの輻射と熱気流を考え、それらによる影響を火災危険度ポテンシャルとして定式化した。燃焼建物からの輻射については、燃焼建物内の高温ガスと開口部から噴出する火炎を輻射源と考え、それらを一点に代表させることで避難者に入射する輻射熱流束を求めることとした。熱気流については、既往の相似則を利用して気流軸上の温度上昇を予測した後、気流軸と避難者との距離を考えることで温度上昇の減衰を算出することとした。複数の熱気流が合流する効果は、既往の関係式を利用することで、単一の熱源によってもたらされる温度上昇を重ね合わせることであった。

次に、心理危険度ポテンシャル評価モデルでは、広域避難場所といった市街地の安全な空間に向かって避難が行われる様子を、ポテンシャルによって表現する手法を考えた。ここでは、理想流体の二次元流れからの類推で、流体力学的な考え方を道路ネットワーク上の人間の移動現象に置き換え、心理危険度ポテンシャルの計算式を導出した。この計算には、住民が考える避難先を境界条件として与える必要があるが、避難場所の魅力度の偏りを考慮して避難先を予測する手法を、第5章で得られた成果を基に組み込んだ。

最後に、避難者の行動モデルについては、個々の避難者の行動を時間ごとに記述することで避難者全体の予測へとつなげる手法を採用した。住民の避難開始要因は火災からの影響に限定するものとし、燃焼建物からの輻射と熱気流をもとに避難開始確率として定式化した。避難者は、火災危険度ポテンシャルと心理危険度ポテンシャルを合成した総合的なポテンシャルの高い地点から低い地点へと移動し、避難場所に到達することで避難が完了するものと考えた。この時の移動速度については、群集流を仮定した既往の密度速度式を利用することで、計算の簡略化を図った。避難者は高温気体の吸収による気道熱傷によって避難不能になるものと考え、避難者が曝露される気体温度の累積量をその指標とした。累積量の計算には、気体曝露に関する既往の関係式を利用し、それに含まれる未知定数を既往の火災死亡データから推定することで整理した。

第3章 計算負荷の軽減を重視した市街地火災の物理的延焼モデル

第3章では、既往の物理的延焼モデルに計算速度の高速化と情報量の軽減のための新たなアルゴリズムを導入することで、都市規模の避難シミュレーションに利用可能な延焼サブモデルの定式化を行った。このモデルでは、市街地火災を複数の建物火災の集合とみなし、他の建物火災の熱的影響下における個々の建物の火災性状を予測することで、都市全体の延焼性状へとつなげる。このとき、市街地火災の拡大現象は、(A)建物内部の火災現象と、(B)建物間の火災拡大現象、の二つに分解される。

建物内部の火災現象は、一層ゾーンモデルの概念に基づいた定式化を行った。このとき、火災の状態を準定常状態に近似することで、時間刻みを陽に用いない物理量の時系列予測式を導いた。また、次の計算上の簡略化を行うことで、計算に必要な情報量の軽減を図った：(i) 複数の室で分割される建物内部の空間構成を無視し、火災性状の計算単位となる検査体積を各階の占有体積に設定する；(ii) 開口部は外壁面および上下階をつなぐ位置に一部ずつ設定し、ガラスといった開口部材は外壁面の開口部にのみ存在する；(iii) 検査体積を構成する複数の壁を一枚の壁で代表させる（開口部材についても同様）。

建物間の火災拡大現象は、その支配要因に、(i) 燃焼建物からの輻射と、(ii) 燃焼建物の風下側に形成される熱気流、の二つを考え、火の粉の飛散による影響は第4章で検討するものとした。これらの要因による火災拡大のモデル化には、既往の物理的延焼モデルの考え方を踏襲するものとし、いずれも模型実験等により既に精度が検証されたモデルを利用することができた。このとき、建物間の延焼はこれらの要因の作用の結果、次のいずれかが満たされた場合に生じるものと考えた：(1) 開口を経由して室内に入射する熱流束が限界値を超えた場合；(2) 可燃性外装材の温度がその熱分解温度を上回った場合。

延焼モデルの妥当性は、数値実験の結果から検証した。まず、建物内部の準定常火災モデルを仮想的な建物に適用し、オイラー法による計算結果と比較した。その結果、本モデルに導入した準定常近似アルゴリズムは、計算刻みを大幅に拡張しても、気体温度を良好に予測可能であることが示された。次に、延焼モデル全体を酒田市大火(1976)に適用し、被災調査報告や既往の延焼モデルと比較することで、モデルの全体的な予測精度と計算負荷について考察した。これによると、火災の拡大速度、および、延焼火災に巻き込まれた領域は調査報告に比べて過大に評価されたものの、火災前線の移動の様子は調査報告と類似する結果となった。また、計算速度や計算に必要な情報量の点で、既往の延焼性状予測モデルを大幅に改善した。

第4章 住民による消火活動を考慮した飛び火現象の確率論的予測モデル

第4章では、火の粉による延焼の発生について確率論的なモデルを採用し、ある建物 j で飛び火が発生する確率 $P_{o,j}$ の定式化を行った。まず、燃焼建物から放出される一つの火の粉 i によって、ある風下側建物 j へ延焼が起こる確率 $p_{o,ij}$ を考えた後、燃焼領域から発生する複数の火の粉の影響下での延焼確率を考えることで、飛び火発生確率 $P_{o,j}$ へと拡張した。

一つの火の粉に着目した場合の飛び火シナリオは、(A) 燃焼建物からの火の粉の放出、(B) 風下側建物への火の粉の飛散、(C) 火の粉の落下位置における可燃物の状況、(D) 火の粉の持つ潜在的な危険性、(E) 周辺住民による火の粉の消火活動、の五つの要素で構成されるものと考えた。その結果、一つの火の粉による延焼の発生は、(1) 火の粉が建物に飛来し、(2) 火の粉の落下位置に可燃物が存在し、(3) 火の粉が可燃物の着火を引き起こす危険性を潜在的に有しており、(4) 火の粉が周辺住民によって消火されない、という過程によって表される。これを燃焼領域から発生する複数の火の粉へと拡張した結果、飛び火発生確率 $P_{o,j}$ が次の式で表わされることが分かった。

$$P_{o,j} \approx 1 - \prod_{k=1}^m [1 - n_{B,k} \cdot p_{S,ij} \cdot p_{C,ij} \cdot p_{D,ij} \cdot (1 - p_{F,ij})] \quad (8-1)$$

このうち、火の粉の発生数 $n_{B,k}$ は燃焼建物 k の発熱速度の累積値に比例するものとし、火の粉が飛来する確率 $p_{S,ij}$ は風向方向を対数正規分布、風向に直角な方向を正規分布で近似した飛散確率の積で表わされるものと考えた。また、可燃物の存在確率 $p_{C,ij}$ および火の粉が着火の危険性を有している確率 $p_{D,ij}$ は、これらに関する知見が乏しいことから一定値をとるものとみなした。最後に、火の粉が周辺住民によって消火される確率 $p_{F,ij}$ は住民の滞在確率に比例するものとみなし、その確率を火災からの影響に起因した避難の開始で表現した。

飛び火モデルの妥当性については、第3章で開発した延焼モデルに組み込むことで酒田市大火に適用し、計算結果を被災調査報告と比較した。計算結果の把握には、モンテカルロ・シミュレーションを利用し、調査報告との比較が可能な飛び火の発生数や延焼速度といった巨視的な指標について考察した。これによると、市街地全体での飛び火の発生数や延焼速度は、未知パラメータ χ_p を調整した場合に当時の調査報告と概ね一致する結果が得られた。

第5章 地震火災時における住民の避難先選択のモデル化

第5章では、避難場所の魅力度を考慮して住民の避難先を予測する手法を構築した。ここでは、避難先の決定構造を数学的に扱うために、(I) 広域避難場所が潜在的に有する「魅力度 Φ 」と、(II) 住民が避難先の候補として考えるための「閾値 Θ 」の二つの概念を導入し、個々の住民がある広域避難場所を避難先の候補として考える確率をモデル化した。

まず、京都市の街頭で2,267名の住民に対してヒアリング調査を実施し、(a) 地震火災時の避難先と、(b) 被験者の属性、に関する質問を行った。調査から得られた回答を整理した結果、避難先選択を支配する要因が、(i) 住民の在住期間、(ii) 住民と避難場所の直線距離、(iii) 避難を妨げる地理的な隙間の存在、の三つであることが特定された。

次に、地震火災時における住民の避難先選択モデルをこれらの支配要因に基づいて定式化し、調査データを用いてモデルに含まれる未知パラメータを推定した。その結果、モデルに導入した二種類の概念量 Φ, Θ を定量化することができ、京都御苑や二条城といった文化的にも観光的にも重要な広域避難場所は、魅力度 Φ が非常に高いことが分かった。

最後に、定式化した避難先選択モデルを京都市全域に適用することで、広域避難場所の流入避難者数を推定し考察を加えた。計算結果から、魅力度 Φ の高い広域避難場所が近接して配置されている地域では、殆どの住民が何らかの広域避難場所を避難先として考えることができることが分かった。また、京都市によって指定されている広域避難場所の殆どが、最低限の収容可能人員を担保していることが明らかになった。ただし、魅力度の大きさと収容可能人員との間に大きな隔たりのある一部の広域避難場所では、地震火災時に避難者を十分に収容できない危険性が懸念される。

第6章 避難性状予測モデルの検証

第6章では、避難モデルの妥当性を検証することを目的として、過去の地震火災の中でも最大の規模で避難が行われた関東大震災（1923）に着目し、避難シミュレーションによる計算結果と被災調査報告との比較を行った。避難シミュレーションにあたっては、入力条件として必要な燃焼領域の時間変化を、被災調査から作成された延焼動態図を基に再現した。計算結果では、避難性状予測モデルに導入した三種類のポテンシャルについて、その空間分布を可視化し、ポテンシャルの概念が地震火災時の都市避難予測に有効であることを確認した。また、避難不能者の最終的な人数は、定数 χ_p を調整した場合に被災調査報告と概ね一致する結果が得られた。ただし、避難不能者の発生箇所や避難場所の避難人数については、一部で調査報告と類似する結果が得られたものの、残りでは調査報告との間

に幾分の誤差が見られる結果となった。これには、(i) 設定した避難者の初期位置の信頼性に限界があること、(ii) 計算にあたって設定した避難場所の数が不足していること、(iii) 避難場所の魅力度の偏りを考慮していないこと、といった原因が関連しているものと考えられる。

第7章 避難シミュレーションを用いた避難安全対策の有効性評価

第7章では、京都市において将来的に発生の予想される地震火災を想定し、避難シミュレーションを行うことで、避難安全対策の有効性評価を行った。避難シミュレーションにあたっては、入力条件として必要な燃焼領域の時間変化を延焼シミュレーションによって予測し、広域避難場所の魅力度の偏りを考慮して住民避難の全体像を把握した。その後、避難上の被害を抑制するためのいくつかの対策の中から、避難開始の早期化や避難先の指示といった火災発生後の応急的な対策を選択し、その効果を避難不能者の発生数の点から定量化した。

一般的に、市街地構造の改変といった都市計画的対策は、それにかかる莫大な費用、住民の経済的な制約、土地・建物に対する強い権限によって、急速な改善を望むことは難しいという問題があった。そこで、こうした問題を踏まえ、避難を円滑に進めるための応急的な人的対応に着目し、その可能性を探った。ここでは、こういった対策の具体的な実現方法を検討しなかったが、避難の開始を早めると同時に避難先を指示することで、避難不能者の発生数が大幅に低減され、避難安全対策の有効性を定量的に評価することができた。

8.2 課題と展望

都市を直撃する巨大地震時には、同時に発生する複数の延焼火災によって、多くの住民が都市全域の規模で避難行動を開始する事態が予想される。地震火災の危険性から都市住民の安全を確保するには、都市計画や地域防災計画の中で、事前に有効な避難安全対策を考慮しておくことが重要である。

有効な対策を立案するには、その実施効果について定量的な評価を行える必要がある。それには、地震火災時における住民避難の全体像を合理的に予測可能な手法の開発が不可欠であり、本研究で開発した避難性状予測モデルは、こうした役割を果たすことができるものと考えられる。しかし、現在の段階でその予測技術が十分に確立された訳ではなく、今後も継続して改良を加えていく必要がある。そこで、主な研究課題をまとめると、次のようになる。

(1) 地震火災時の避難を構成する各種現象のモデル化

本モデルでは、現段階で考慮できていない現象をいくつか残している。

一つには、地震が発生してから住民が避難を開始するまでの対応行動が挙げられる。今回のモデル化では、避難の開始要因を火災からの影響に限定し、輻射熱や熱気流の温度上昇に応じて線形的に変化する確率論的モデルを採用した。こうしたモデルの組み込まれた

避難モデル全体の予測精度については、第6章で確認がなされたものの、住民の初期行動に関する細部のモデルは、その妥当性について不明な点が多い。地震時には、建物の損壊といった火災以外の要因によって避難したり、火災被害を受けても消火活動に従事することで避難の開始が遅れる場合もある。地震被害に対するこうした複雑な対応行動をモデル化し、何らかの形で検証する必要がある。

二つは、構造物の損傷による瓦礫の道路への流出が挙げられる。地震時には、建物や電柱といった構造物が倒壊し、巨大な障害物となって道路を塞ぐ事態が予想される。こうした現象は、避難経路の性能をいくらか低下させる場合が多いが、どこでどの程度の障害が発生するのかといった点については明らかにされていない。

もう一つは、道路上の車両の存在が挙げられる。交通活動の活発な地域では、道路上の車両は歩行避難者の障害になることが予想される。また、避難モデルを適用する地域によっては、自家用車を利用した避難が支配的になる場合もある。こうした歩行者と車両が混在した場合の避難性状の予測技術は、いまだ確立されていない。

(2) 建物単体に着目した地震後出火のモデル化

地震火災の延焼性状は、出火条件、気象条件といった様々な不確定要因によって大きく左右される。将来の地震を想定した場合に、現実的な避難性状を予測するには、こうした不確定要因の合理的な評価が必要となる。このうちの出火条件については、行政区の出火率を倒壊率の関数として経験的にモデル化することで、市街地全体の出火件数を予測した(第7章)。このような大規模な地域を単位とした統計的处理は、地震火災時の出火件数が市街地を構成する建物の数に比べて非常に少ないことを受けている。こうした手法の利点は、倒壊率の側で建物構造や地震動の特性を考慮した評価ができれば、比較的簡便な関係である程度尤もらしい出火率を計算できる点にある。しかし、行政区の中のどの建物から出火するのかといった出火点そのものの位置を特定することはできないため、市街地火災を個々の建物ベースで考える延焼モデルでは、その利用に限界がある。また、出火率を倒壊率のみによって予測するため、建物用途に応じて異なる出火の起こり易さが平均化されることになる。そこで、地震動に伴う火災の発生を個別の建物に着目して予測可能な手法の開発が必要である。

(3) 都市内滞留者の時空間分布

地震発生時に避難者がどこに何人いるかは、避難シミュレーションの計算結果を大きく左右する。こうした避難者の初期位置に関する問題は、モデル検証を目的として行った関東大震災の避難シミュレーションでも言及した(第6章)。都市内の人口分布は、時間に応じて大きく変化するが、これは、都市に関連する個々の人間のある程度規則正しい生活習慣が積みあがった結果と言える。また、京都市のような観光資源を豊富に所有する都市では、観光客といった不確定な行動主体が人口分布に影響を与える。こうした人口分布を把握するための手法は、現実的には、悉皆調査である国勢調査に限られており、夜間人口以外の動的な分布は明らかにされていない。地震被害想定といった将来の予測をより合理的に行うには、都市内滞留者の時空間分布を適切に予測可能な手法の開発が必要である。

(4) リスクの概念に基づいた避難安全性能の評価手法

地震火災の延焼性状は、出火条件、気象条件といった様々な不確定要因によって大きく左右される。こういった不確定要因が地震時に出現する形は、何らかの確率分布を持っており、被害の大規模化をもたらす条件は、分布の裾に存在するものと考えられる。第 7 章で考慮した風速 5m/s の計算もこうした稀な条件に相当し、これまでの地震被害想定においても、最悪条件といったいくつかのシナリオを経験的に当てはめた予測を行っている。地震火災の被害を抑止するための対策を講じる場合、こうした稀な被害に合わせて対策を立案するのは合理的ではなく、対策にかかる費用の予算的な制約からも現実的ではない。そこで、地震火災の被害をリスク（発生確率と損失の積）といった期待値や、被害そのものの確率分布といった形で整理する必要がある。これには、不確定要因の出現確率をモデル化し、モンテカルロ・シミュレーションといった多数の火災シナリオを考慮した計算を行う必要がある。こうした考え方は、都市が持つ避難安全性能のばらつきを評価し、目標とすべき性能の決定やそのための対策立案を助けるものと考えられる。

謝辞

本論文は筆者が京都大学防災研究所・空間安全工学講座に学部学生として配属された2006年4月から2011年3月に至る5年間の研究成果を纏めたものです。この間、京都大学防災研究所 教授・田中哮義 博士には、恵まれた研究環境を与えて頂きますとともに、ご多忙にも拘わらず、常に親身になったご指導を頂きました。ここに学位論文をまとめることができましたのも、田中先生の多岐にわたるお力添えのおかげに他なりません。ここに、心からの謝意を表します。

本研究を進めるにあたっては、多くの方々にご協力を賜りました。ここに記して、これらの方々への感謝の意に代えさせていただきます。

三菱重工業株式会社 原子力プラント設計部 主任・円谷信一 氏には、避難性状予測モデルのプログラム開発、ならびにポテンシャル計算のためのアルゴリズム（第2章）について貴重なご助言を頂きました。

避難シミュレーションに必要な火災条件の予測を目的として開発された延焼サブモデル（第3章）は、京都大学次世代開拓研究ユニット 助教・樋本圭佑 博士に提供して頂いたプログラムの計算アルゴリズムに改良を加えたものです。また、酒田市大火の検証（第3, 4章）に必要な市街地データについても、提供して頂きました。

ヒアリング調査の実施、ならびに取得データの解析（第5章）にあたっては、京都大学 学部学生・小野山薫 氏にご協力を頂きました。

本論文の審査にあたっては、京都大学大学院 教授・清野純史 博士、同 教授・原田和典 博士より有益なご助言を頂き、今後の研究の方向性についても貴重な示唆を頂きました。厚くお礼申し上げます。

最後に、研究を進めていく上での支えとなり、絶え間ない応援をしてくれた、家族、友

人，そして歴代の研究室メンバーの協力に心から感謝します．

なお本研究は，京都大学防災研究所 防災研究推進特別事業経費（2009 年度），ならびに，
文部科学省 科学研究費補助金 特別研究員奨励費（2010 年度）の助成を受けました．

2011 年 3 月

研究業績リスト

A. 論文(審査付き)

- 1) T.Nishino, S.Tsuburaya, K.Himoto and T.Tanaka: A Study on the Estimation of the Evacuation Behaviors of Tokyo City Residents in the Kanto Earthquake Fire, Fire Safety Sci., Proc. 9th Int. Symp., pp.453-464, 2008.9
- 2) 西野智研・円谷信一・樋本圭佑・田中哮義: 関東大震災における東京市住民避難性状の推定に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol.74, No.636, pp.105-114, 2009.2
- 3) 西野智研・円谷信一・樋本圭佑・田中哮義: 準定常的な計算による都市火災延焼性状の簡易予測モデルの開発, 歴史都市防災論文集 Vol.3, pp.5-12, 2009.6
- 4) 西野智研・円谷信一・樋本圭佑・田中哮義: 準定常的な計算法を用いた都市火災延焼性状の簡易予測モデルの開発, 日本建築学会環境系論文集, Vol.75, No.647, pp.9-18, 2010.1
- 5) 西野智研・樋本圭佑・田中哮義: 住民による消火活動を考慮した飛び火現象の確率論的予測モデルの開発, 日本火災学会論文集, Vol.60, No.2, pp.11-20, 2010.10
- 6) T.Nishino, K.Himoto and T.Tanaka: A Probabilistic Model of Spot Fires in Urban Fire Considering Resident Firefighting, Fire Sci. Tech., Proc. 8th Asia-Oceania Symp., pp.1-10, 2010.12
- 7) 西野智研・樋本圭佑・田中哮義: 地震火災時における住民の避難先選択のモデル化, 日本建築学会環境系論文集 (投稿中)
- 8) T.Nishino, K.Himoto and T.Tanaka: A Model for Destination Choice for Evacuation by Residents in Post-earthquake Fire Event, Fire Safety Sci., Proc. 10th Int. Symp. (投稿中)

B. 論文(口頭発表)

[国際会議・シンポジウム]

- 1) T.Nishino, S.Tsuburaya, K.Himoto and T.Tanaka: Development of a Physics-based Model for Fire Spread in a Large-scale Urban Area Consisting of Over 10^5 Buildings, The 9th IIASA-DPRI Conference on Integrated Disaster Risk Management, 2009.10
- 2) T.Nishino, S.Tsuburaya, K.Himoto.K and T.Tanaka: Validation of the Potential-based Evacuation Model of City Residents in Post-earthquake Fire, Proceedings of 5th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, pp.399-406, 2010.3
- 3) T.Nishino, S.Tsuburaya, K.Himoto and T.Tanaka: Evacuation Behavior of over 10^6 Residents in Post-earthquake Fire Scenarios in Kyoto City, Proceedings of 10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference, pp.1-10, 2010.6
- 4) T.Nishino, S.Tsuburaya, K.Himoto and T.Tanaka: Evaluation of the Fire Safety Performance of Kyoto City in Post-earthquake Fire Scenarios, Proceedings of 12th INTERFLAM, pp.1175-1188, 2010.7
- 5) T.Nishino, S.Tsuburaya, K.Himoto and T.Tanaka: Evacuation Simulation of City Residents in Large-scale Urban Area in Post-earthquake Fire Scenario, International Conference Proceedings on Emergency Preparedness, pp.69-75, 2010.9

[日本建築学会大会]

- 1) 西野智研・円谷信一・田中哮義: 関東大震災における東京市住民避難性状の推定に関する研究, 日本建築学会大会(広島) 学術講演梗概集 A-2, pp.53-54, 2008.9
- 2) 西野智研・円谷信一・田中哮義: 準定常的な計算による建物火災性状の簡易予測モデルの開発, 日本建築学会大会(東北) 学術講演梗概集 A-2, pp.299-300, 2009.8
- 3) 円谷信一・西野智研・田中哮義: 都市災害を想定した避難シミュレーションシステムの開発 自家用車利用避難のモデル化, 日本建築学会大会(富山) 学術講演梗概集 A-2, pp.257-258, 2010.9
- 4) 西野智研・小野山薫・樋本圭佑・田中哮義: 地震火災時避難場所に対する京都市住民の認知度の推定に関する研究, 日本建築学会大会(富山) 学術講演梗概集 A-2, pp.355-356, 2010.9

[日本火災学会研究発表会]

- 1) 那須野晶子・西野智研・円谷信一・樋本圭佑・田中哮義: 市街地火災時における都市住民避難モデルに関する研究 その1, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.32-33, 2007.5
- 2) 西野智研・那須野晶子・円谷信一・田中哮義: 市街地火災時における都市住民避難モデルに関する研究 その2, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.34-35, 2007.5
- 3) 西野智研・円谷信一・樋本圭佑・田中哮義: 関東大震災における東京市住民避難性状の推定に関する研究, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.212-213, 2008.5
- 4) 邵珮君・西野智研・水上天晴・田中哮義: 区画火災の予測の条件による火災性状の差異, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.102-103, 2009.5
- 5) 西野智研・円谷信一・樋本圭佑・田中哮義: 大規模市街地における同時多発火災の物理的延焼性状予測モデルの開発, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.252-255, 2009.5

- 6) 円谷信一・西野智研・田中哮義: 都市火災を想定した避難シミュレーションシステムの開発 (自家用車避難のモデル化), 日本火災学会研究発表会概要集, pp.172-173, 2010.5
- 7) 西野智研・樋本圭佑・田中哮義: 飛び火現象の確率論的予測モデルに関する数値計算的考察, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.170-171, 2010.5

C. 研究助成

- 1) 京都大学防災研究所 防災研究推進特別事業経費: ポテンシャル法に基づく地震火災時の避難シミュレーションモデルの開発, 2009 年度
- 2) 文部科学省 科学研究費補助金 特別研究員奨励費: 都市域大地震火災時における住民避難性状の推定に関する研究, 2010 年度

